



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

---

MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO DE MEDICIÓN  
PARA EL MONITOREO DE pH, CONDUCTIVIDAD Y  
TEMPERATURA DEL AGUA.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y  
TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES**

PRESENTA

**I.A. ALAIN SERRANO ROQUE**

**ASESOR: DRA. JOSEFINA VERGARA SÁNCHEZ**



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

CUERNAVACA, MORELOS

AGOSTO, 2020

---

---

---

---

Este proyecto se realizó en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, bajo la asesoría de la Dra. Josefina Vergara Sánchez y con el apoyo financiero del Programa de Becas de Posgrado del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

---

---

## COMITÉ REVISOR

---

---

### COMITÉ REVISOR:

**Asesor: Dra. Josefina Vergara Sánchez**

**Dr. Hugo Saldarriaga Noreña**

**Dr. Horacio Martínez Valencia**

**Dr. Cesar Torres Segundo**

**Dr. José Guadalupe Velázquez Aguilar**

---

---

## VOTOS APROBATORIOS



**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 24 de agosto de 2020.

Dr. Hugo Saldarriaga Noreña  
Dr. Horacio Martínez Valencia  
Dra. Josefina Vergara Sánchez  
Dr. Cesar Torres Segundo  
Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar  
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 LA ALAIN SERRANO ROQUE titulada: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO DE MEDICIÓN PARA EL MONITOREO DE pH, CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA DEL AGUA, realizada bajo la dirección de la DRA. JOSEFINA VERGARA SANCHEZ en el Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. 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. MARIA DEL CARMEN TORRES SALAZAR**  
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DE LA FCQeI

### DICTAMEN

**DRA. MARIA DEL CARMEN TORRES SALAZAR**  
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO 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:

### DICTAMEN

NOMBRE	VOTO	FIRMA
Dr. Hugo Saldarriaga Noreña	APROBADO	
Dr. Horacio Martínez Valencia	APROBADO	
Dra. Josefina Vergara Sánchez	APROBADO	
Dr. Cesar Torres Segundo	APROBADO	
Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas

## VOTOS APROBATORIOS



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 ELECTRONICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

MARIA DEL CARMEN TORRES SALAZAR | Fecha:2020-06-24 16:58:07 | Firma:   
E8KuyofW8pkQy8zZaw7CFJdhegT0zm9A72aw00R/14FqfXIm5cb62DT4JnaG8Hbo7drNjpcQkH9Q89zRmJ84DvGGc7SLM1Wkrszb7ufK29kZuACK3AulAqQgAdX8ywe88  
Y80V+0RG4dm0nA.FJ1QW3LqqJ5a0mE87NGI5O9mvgL1mLTT82100qM62089wzW0lyvKZb00UgRkWqJLM8yb+okmhmkY200eFW0qWy6e45w09a8W188kduuDeHh  
XHozmURk9m5H17aHTAARh8F8q7RnRMA0X5J8N+7adQa759F73b+Kca7DrLjW9EaQ...

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



HtnLiq

<https://ofirma.uaem.mx/nc/Repudio?YRbGhjaH1GLAFMydY5CX8VdcLV86c>



# VOTOS APROBATORIOS



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

**CESAR TORRES SEGUNDO** | Fecha: 2020-08-24 19:22:27 | Firmante  
Eovvva6aMhpU1zGrZad+HCLb4HbPFZgNe5gioHMkTyg9uFRDaPm0U7Qx7B9vvhOysAC9Dk0oovoCd50Qu+1Thhg55IE3rL5eA99ZM1eASRTgOeGEU8jvqvpmPhtLd3  
bF+m6hJNRcLYewidL75WcM6nlyRnAKRzRzUvqG7ozamA1ud+GggOomXPa5HjEz5N6cOK1EzP6jVw6WVelu1JyP3TCgIez2Dw47lpyQdeP2anZmTAn75gA2125  
5dGk+Qvq25yobZq3LaThFJ3n65qPH1M8gOevvPH5e2xyce6AL4d5U5y6a55LgZzRg\*\*

**JOSEFINA VERGARA SANCHEZ** | Fecha: 2020-08-24 21:22:11 | Firmante  
iC6u5uCOAWyP1evM6CyluKvUWC+pwFCrOg4oemgQ38D5bREY76A4GcRTD5lqA25W6C50dcazRz2vpePwIqghwmtP1Y6qMCHRLuCO4wo+1qR1h5DL3a2e36z87NCT  
b5UBUp+myNqLZ1h6Y56zoz2vQ6Nw5DmszKCPA5g9zOouTvoomdKQpobKXNGPh8mLST1qj00amz4h2oQkace69h6ygy5hM2LCoKImY66TlgWR9e28tpGKQvnc2Z0  
2CQh0v9567L9nDvz1BKL8p3CTaRPPhCrIqnv956PaFm1zhNLUWduXvnlUe6TIE5Q\*\*

**HUGO ALBERTO SALDARRIAGA NORDEÑA** | Fecha: 2020-08-25 10:48:44 | Firmante  
gTR5De4C0YmE MSe55LzLzuevo7ve4EqhH6WwDp63mewLKGwGdL3K95AReG5mA+Mp47LxRtLX+qWYRMAPlu0aPa5ACANTgR1Rv9NW9HcH0Ru+je+UEXa05W  
4dAalmk4+HPrtyRKn23LuLVQIPQGXlpImFLAWX75A5gTHQIQXaab66RzjHJSEAMCOgTuv822a6M501CK4WgHVV5U46VW2JY4Rz+dGvFmR1W6cc0z6Cg5NgWOL  
FSU8neGadTGNAn1Hf9FW6m+pnIG6HjPv0j0pbT7bbZducaKZR.jpE2dvqmQUKJ0jcoAg\*\*

**HORACIO MARTINEZ VALENCIA** | Fecha: 2020-08-25 11:28:28 | Firmante  
SMEAnt6YbVsn+8HQ3QMpluGJnOGQv5e6mLkXGdvt7OVg3aXTTYANLR1HRaJ906pG9w6SLnzPku+4K7Jp2+8dFp1A5CkF6MeE5DPZRX6QZPzod9W5607Ex2YB  
n675BgTb3DhVnd7IOT552Vq23q82MvG+RWS5DXUm9grwa76RAb4lvmUk6Q1DRoLAI+wGg00Mhp29VW6dPka0vwaRnCAlazD1h1QztdPnTbg0q87h0K0mZ5g+G  
mJMN6j0R5uK1obnNulRp4RG5+loL4W6d5uicTm5vUOGelLudD6DZnd5W6R6d000kicTg\*\*

**J GUADALUPE VELASQUEZ AGUILAR** | Fecha: 2020-08-25 18:34:21 | Firmante  
rPgeWCFECJOGV08ugUueFy748MO6Cytw7717ea3M8ooFeY2e0pV6N0iq7X0WPadmu2j4D4gPj6maloJdmOLpuCLmAYYmgG0eE0at5t1Juv09nefDwV250y6q58q2  
fYETSAk+RMMVZ4UNR9w85h6KuzCM+8E+GOLaNC+R3MwvPCw13a24TgnIGtpB0ce267+Yv0YHJA5D5E2GCOF5p+grvPhRMVtkfEWA6mKQ6eRzJq53eaf+6o  
LF1z8gVc68h3uNa3PVF5M0pocpL9hagQX8hV8w0es71tzy6vZ2z73m96bg\*\*

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



3X7mE

<https://firma.uaem.mx/hc/RepudioGy6mH6H6dEY10vUQAm2UGeE800>



---

---

## DEDICATORIA

## DEDICATORIA

**A mi esposa, por ser mi todo, mi sustento, mi amiga, mi amante, mi colega,  
mi compañera y por estar siempre a mi lado en las buenas y malas, brindándome su amor.**

**A mi hija, por su amor incondicional y por tener el poder de alegrarme la  
vida en los peores momentos.**

**A mi mamá, por ser la luz que guía mis pasos.**

**A mi abuela Mery, por guiarme a convertirme en el hombre que soy.**

**A mi papá y mis suegros, por estar siempre presentes y recordarme que  
con sacrificio todo es posible de lograr.**

**Al resto de mi familia y amigos, por ser parte importante en mi vida.**

---

---

---

---

## AGRADECIMIENTOS

---

---

### AGRADECIMIENTOS

A la primera persona que debo agradecer es a mi esposa. Suset, mi amor, muchas gracias por siempre estar presente, juntos hacemos muy buen equipo y creo que lo hemos demostrado en estos 20 años que llevamos juntos, desde que nos conocimos en el preuniversitario. Gracias por compartir conmigo tanto los momentos buenos como los momentos difíciles que nos ha dado la vida. Muchas gracias por apoyarme a continuar con este sueño de superación profesional que sin ti hubiera sido imposible. Gracias por estar a mi lado siempre brindándome tu amor, cariño, tu paciencia y tus consejos.

A mi hija Lianet, muchas gracias mi Ponty por siempre estar a mi lado y ayudarme a alegrar mis días, por ser tan cariñosa, inteligente, responsable y buena. Continúa siendo tan buena estudiante para que en el futuro seas como tus padres.

A mi mamá, donde quieras que estés, muchas gracias por estar siempre conmigo, cuidarme, guiarme y protegerme.

A mi abuela Mery, por ser esa persona tan especial en mi formación, por tanto amor y cariño que me entregó, y por siempre estar presente.

A mi papá, gracias por cuidarme y protegerme. Por darme fuerzas y apoyarme en todas mis decisiones.

A mis suegros Bibiana y Jesús, muchas gracias por el amor y apoyo incondicional que siempre me han dado, así como a mi cuñada Viviana y a su esposo Odlavin, por siempre estar presentes cuando los he necesitado, junto a mis sobrinos Liah, tito y Eduar y toda esa bella familia de Mariano.

A mi tío Carlos, por siempre estar presente y apoyarme cuando lo necesité, únase también a este agradecimiento a todo el resto de la familia por allá por Miami, mi tía, mi prima y los pequeñines. Así como amigos que también están por allá; Gianni, Kirenía, Reidel, Yeny, entre otros, que a pesar de estar lejos siempre están presentes para ayudarme y dispuestos a apoyarme en lo que necesite.

---

---



## AGRADECIMIENTOS

---

---

A mi familia en Mantilla, mis hermanos Yoan, Ariel y Aibel, a Vivian, a mis tíos y sobrinos, y toda mi familia por allá, gracias por siempre estar al pendiente de mí y de los avances de mis estudios.

Deseo dar un especial agradecimiento a la Dra. Josefina Vergara Sánchez. Por confiar y apostar por mí, sin su apoyo mis sueños de superación no hubieran podido ni comenzar. Muchas gracias por su tiempo, dedicación, enseñanza, paciencia y entrega. Sin Ud., este sueño no lo hubiera logrado.

Al Dr. Hugo Saldarriaga Noreña por sus excelentes recomendaciones aportes y su gran apoyo en toda la parte experimental de la investigación.

Al Dr. Horacio Martínez por sus enseñanzas, sus correcciones y recomendaciones siempre tan acertadas.

Al Dr. Cesar Torres Segundo por su apoyo, por las recomendaciones y correcciones realizadas durante toda la investigación.

Al Dr. José Guadalupe Velázquez Aguilar por sus enseñanzas y sus excelentes conocimientos en la electrónica y la programación de Arduino. Muchas gracias por colaborar y brindar su apoyo a la investigación.

A mi amigo Ramón, muchas gracias por tu apoyo y tú guía para continuar con esta etapa de superación en mi carrera profesional. Gracias a ti logré romper el hielo de la comodidad y el confort en Cuba y venir a este país a continuar forjándome como profesional. También agradecer a Yordanis, ya que ambos me acogieron en su casa a mi llegada y siempre me indicaron cual era el camino correcto a seguir.

A Jazmín muchas gracias por el apoyo que me brindaste en los inicios de esta aventura, yo estando en Cuba, con tantas dudas y preguntas por hacer. Gracias por ayudarme a tomar la decisión correcta, también incluir en este agradecimiento a tu mamá Regla, por siempre estar presente, por aconsejarme y apoyarme. Muchas gracias por estar para mí en todo momento y ser parte de mi familia.

---

---

## AGRADECIMIENTOS

---

---

A Gerson y Alberto, amigos desde el preuniversitario, a los que me dio muchísima alegría reencontrarme por acá, muchas gracias por siempre estar presentes para responder todas las inquietudes y apoyarme en todo.

A la Dra. Constanza, Dra. Mariana, Karen y Dra. Loida, muchas gracias por su apoyo incondicional y comprensión en cada etapa de mis estudios. Fueron piezas claves en cada semestre y en cada gestión por hacer.

También quiero presentar agradecimientos a la Dra. Laura Irene Morales y al Dr. Moisés Montiel por el apoyo brindado en el inicio de mi postulación al posgrado. Muchas gracias por confiar en mí y por la orientación y las recomendaciones realizadas que permitieron que pudiera comenzar este sueño de superación personal.

A mis profesores, qué durante esta etapa de formación, inculcaron en mí, esos nuevos conocimientos profesionales tan importantes para cualquier investigación. Ellos son el Dr. Roberto Flores, Mtro. Jorge Viana, Dra. Constanza Machín, Dra. Ave María Cotero, Dra. Guadalupe Valladares, Dra. Rosa María Melgoza, Dra. Yolanda Flores, Dra. Mariana Romero, Mtro. Julio César Lara. A todos muchas gracias.

Muchas gracias a todos los cubanos que he conocido por acá por Cuernavaca, que algunos desde mi llegada y otros que se han ido incorporando, siempre me han hecho sentir como en casa. En especial quiero agradecer, Adriana, Edy, Alejandro, Lisandra, Félix, Roger, Yarini, Gilberto, Heilyn, Guille, Nilda, Jesús, Mirza, Henry, Daryl, Daily, Maykel, Eya y algunos otros que se me olvidan porque ya somos bastantes por acá. Muchas gracias a todos.

A mis compañeros de la MIATS les debo agradecer porque, desde que llegué a México, me hicieron sentir parte de ellos, mostrándome su cariño y apoyo. En especial, quiero agradecer a Karen Gallegos, Karen Arrieta, Vane, Diego, Arquí, Enmanuel, Ian, Ivonne, Verónica, Dennis, Selina, Leopoldo, Enmanuel, Nestor, entre otros.

---

---

## AGRADECIMIENTOS

---

---

En general, quiero agradecer a toda mi familia y amigos en Cuba y el resto del mundo, que desde lejos, siempre han estado presentes en llamadas, mensajes y correos electrónicos.

A todos, muchas gracias.

---

---

## ÍNDICE

---

---

### ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS .....	xvi
RESUMEN .....	xvii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.FUNDAMENTOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN .....	5
1.1. ANTECEDENTES .....	6
1.2. MARCO TEÓRICO.....	15
1.2.1. Análisis del agua .....	15
1.2.2. Conductividad Eléctrica .....	17
1.2.3. Potencial de Hidrógeno (pH) .....	21
1.2.4. Temperatura (T).....	24
1.2.5. Arduino .....	26
1.2.6. Comunicaciones inalámbricas.....	27
1.2.7. ThingSpeak .....	28
CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN .....	30
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	31
2.2. JUSTIFICACIÓN .....	33
2.3. HIPÓTESIS.....	35
2.4. OBJETIVO GENERAL.....	35
2.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	36
CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGIA EXPERIMENTAL .....	37
3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	38
3.2. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL .....	40
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
CAPÍTULO IV. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	48
4.1. RESULTADOS.....	49

---

---

## ÍNDICE

---

---

4.2.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	59
4.2.1.	Sensor de Temperatura.....	59
4.2.2.	Sensor de pH.....	62
4.2.3.	Sensor de conductividad .....	66
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....		71
5.1.	DISCUSIÓN .....	72
5.1.1.	Análisis de los resultados estadísticos obtenidos en la validación de los sensores.....	72
5.1.2.	Análisis económico del costo del equipo desarrollado. ....	75
5.2.	CONCLUSIONES .....	77
PERSPECTIVAS.....		78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		79
ANEXO-1. Programación desarrollada en el Arduino. ....		84
ANEXO-2. Pinout y características del Arduino DUE.....		89

---

---

## ÍNDICE DE TABLAS

---

---

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Valores de la conductividad eléctrica en diferentes aguas. ....	18
Tabla 1.2: Escala de valores de pH y ejemplos. ....	22
Tabla 3.1: Valores medición de temperatura. ....	38
Tabla 3.2: Valores medición de pH. ....	39
Tabla 3.3: Valores medición de conductividad. ....	40
Tabla 4.1: Valores obtenidos en laboratorio para la validación del sensor de temperatura. ....	60
Tabla 4.2: Valores obtenidos en laboratorio para la validación del sensor de temperatura. ....	62
Tabla 4.3: Valores obtenidos en laboratorio para la validación del sensor de pH.....	63
Tabla 4.4: Valores obtenidos en laboratorio para la validación del sensor agrupados por bloques. ....	64
Tabla 4.5: Valores obtenidos mediante el cálculo para cada bloque. ....	65
Tabla 4.6: Valores de % de desviación obtenidos. ....	66
Tabla 4.7: Valores obtenidos en laboratorio para la validación del sensor en unidades de $\mu\text{S}/\text{cm}$ .....	67
Tabla 4.8: Valores obtenidos en laboratorio para la validación del sensor agrupados por bloques en unidades de $\mu\text{S}/\text{cm}$ .....	68
Tabla 4.9: Valores obtenidos mediante el cálculo para cada bloque. ....	69
Tabla 4.10: Valores de % de desviación obtenidos. ....	70
Tabla 5.1: Resumen de valores de incertidumbre obtenidos en la validación del sensor de pH. ....	72
Tabla 5.2: Resumen de valores de incertidumbre obtenidos en la validación del sensor de conductividad.....	73
Tabla 5.3: Costo de los equipos utilizados en el proyecto.....	75

---

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

---

### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Proyecto RIFFLE. ....	11
Figura 1.2: Proyecto Mãe d'água. ....	12
Figura 1.3: Equipo medición calidad del agua desarrollado UAM. ....	14
Figura 3.1: Estrategia experimental para el desarrollo del proyecto.. ....	41
Figura 3.2: Características del Arduino DUE. ....	42
Figura 3.3: Sensor de Temperatura DS18B20. ....	42
Figura 3.4: Sonda de medición de conductividad. ....	43
Figura 3.5: Sonda de pH. ....	44
Figura 3.6: Panel Solar 12 V y 3W, batería tipo 18650 y módulo de carga BMS. ....	45
Figura 3.7: Módulo WI-FI ESP8266. ....	45
Figura 4.1: Gráfico representativo de la respuesta del sensor. ....	51
Figura 4.2: Implementación del sistema de alimentación eléctrica. ....	53
Figura 4.3: Valores registrados en THINGSPEAK. ....	55
Figura 4.4: Valores exportados a Excel. ....	56
Figura 4.5: Conexión interno del gabinete del proyecto. ....	57
Figura 4.6: Equipo de medición desarrollado. ....	58
Figura 5.1: Gráfico representativo de los datos medidos con ambos sensores de pH. ....	73
Figura 5.2: Gráfico representativo de los datos medidos con ambos sensores de Conductividad. ....	74

---

---

## LISTA DE ABREVIATURAS

---

---

### LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

<b>CE</b>	Conductividad Eléctrica.
<b>T</b>	Temperatura.
<b>pH</b>	Potencial de Hidrógeno.
<b>OD</b>	Oxígeno Disuelto.
<b>TDS</b>	Sólidos Disueltos Totales.
<b>ORP</b>	Potencial de reducción de oxidación.
<b>GitHub</b>	Plataforma de desarrollo colaborativo de proyectos y códigos fuentes.
<b>RIFFLE</b>	Remote Independent Friedly Field-Logger Electronics (Proyecto de código abierto).
<b>Mãe d'água</b>	Water's Mother. (Proyecto calidad del agua de código abierto).
<b>WI-FI</b>	Wireless Ethernet Compatibility Alliance.
<b>IoT</b>	Internet of Things.
<b>ICA</b>	Índice de Calidad del Agua.
<b>IMTA</b>	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
<b>SEMARNAT</b>	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<b>OMS</b>	Organización Mundial de la Salud.
<b>NOM-</b>	Normas Oficiales Mexicanas.
<b>NMX-</b>	Normas Mexicanas.
<b>UAEM</b>	Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
<b>UAM</b>	Universidad Autónoma de México.
<b>Arduino</b>	Placa de desarrollo de hardware y software abiertos y bajo costo.
<b>ThingSpeak</b>	Aplicación de Internet de las Cosas de código abierto.
<b>RA</b>	Riego agrícola.
<b>FA</b>	Fuente de abastecimiento.
<b>PVA</b>	Protección de la vida acuática.

---

---



## RESUMEN

---

---

### RESUMEN

La importancia del agua en la actualidad está infravalorada, debido fundamentalmente a la falta de educación y al mal manejo de este recurso por la sociedad en general, que consideran que el vital líquido es inagotable.

Hoy en día, sólo un pequeño porcentaje (2.5%), corresponde a agua dulce. Si a eso le sumamos el incremento de la población mundial, la demanda de agua, adecuada para el consumo humano, a nivel global cada día aumenta. Ello conlleva a que la preocupación por esta problemática en la actualidad sea mayor.

En el contexto actual, se hace indispensable el ahorro y el buen uso del agua, además del tratamiento adecuado de las aguas residuales. Igualmente, esencial, es el monitoreo periódico y en tiempo real de las principales variables que brindan detalles sobre la calidad del agua, en las distintas fuentes de agua dulce. Todo esto contribuye en cierta medida a evitar la contaminación de las mismas, y por ende con los múltiples beneficios que representa para la conservación del medio y la salud de la población humana.

El equipamiento profesional para medir y monitorear los diversos parámetros de calidad del agua es extremadamente costoso y fuera del alcance de la mayoría de la población. Por ello en los últimos años se viene dando una tendencia a nivel mundial relacionada con el desarrollo de proyectos de investigación para la construcción de equipos de medición de bajo costo.

En este trabajo se diseñó y desarrolló un equipo de medición de los parámetros básicos para la determinación de la calidad del agua, basado en tecnologías de hardware y software de acceso libre. Los parámetros medidos fueron: Temperatura, Conductividad Eléctrica y pH utilizando y diseñando sensores de bajo costo. Las mediciones fueron colectadas utilizando una placa de desarrollo Arduino y mediante un módulo de comunicación Wi-Fi se enviaron los datos a una plataforma de internet de las cosas (IoT: concepto que se refiere a una interconexión digital de objetos cotidianos con internet) para la visualización y el monitoreo en tiempo real de las mediciones. Además, se realizó un análisis

---

---

## RESUMEN

---

---

estadístico para la validación de los sensores desarrollados, contra mediciones realizadas con sensores comerciales utilizados como patrones de referencia.

---

---

## ABSTRACT

---

---

### ABSTRACT

The importance of water today is undervalued, mainly due to the lack of knowledge and neglect of societies in general, which consider the vital liquid is inexhaustible.

The small percentage (2.5%) of fresh water on the planet is becoming more limited every day. If we add to this the increase in the world population, the demand for suitable water for human consumption grows larger every day, leading to a current increasing concern about this problem.

At present, saving and making good use of water, as well as the proper treatment of wastewater, must be taken into account due to their relevance. Equally important is the periodic and real-time monitoring of the main variables that provide us with details on water quality in the different sources of fresh water on our planet, thus helping avoid its pollution and all the consequences that it would bring.

Professional equipment to measure and monitor the various parameters of water quality is extremely expensive and out of reach for the majority of the population. For this reason, in recent times, a worldwide cooperation tendency related to the development of research projects for the construction of low-cost measurement equipment has been unfolding.

In this work, measurement equipment of the basic parameters for the determination of water quality, based on free access hardware and software technologies, was designed and developed. Temperature, Electrical Conductivity, and pH were measured using and designing low-cost sensors. These measurements were collected using an Arduino development board and through a Wi-Fi communication module. The data was sent to an Internet of Things (IoT) server for the visualization and real-time monitoring of the measurements. Later, a statistical analysis was performed, to validate the developed sensors against measurements made with professional sensors used as standards.

---

---

## INTRODUCCIÓN

---

---

### INTRODUCCIÓN

El valor del agua para el ser humano es innegable, no solo forma parte del 65% de nuestro cuerpo, sino porque ha sido fundamental para el desarrollo de toda civilización a través de la historia. Este líquido es la principal fuente de vida del planeta.

La disponibilidad de agua a nivel mundial se distribuye de la siguiente forma: 97.5% se encuentra en los océanos y mares de agua salada; únicamente el restante 2.5% es agua dulce. Del total de agua dulce en el mundo, aproximadamente el 69% se encuentra en los glaciares, los permafrost y casquetes polares. Solo el resto del agua dulce en el mundo, escurre por las cuencas hidrográficas (JUMAPAM, 2016). De ahí la importancia actual relacionada con el ahorro del agua potable y con el tratamiento de las aguas residuales.

En el contexto actual, donde la disponibilidad del agua cada día es más limitada, además de que su calidad se ha ido deteriorando como consecuencia del incremento de la población y las diversas actividades humanas, sugiere la necesidad de establecer programas de mitigación y/o control de la contaminación de esta, para ello es importante tener al alcance sistemas de monitoreo confiables, que permitan registrar la información de algunos de los parámetros medidos en tiempo real, y con ello obtener índices de calidad del agua.

Uno de los métodos convencionales para evaluar la calidad del agua, es la recolección de muestras que posteriormente se trasladan al laboratorio para ser analizadas mediante técnicas analíticas estandarizadas. En general estas técnicas requieren más tiempo y equipos costosos, además se corre el riesgo de que algunos de los parámetros de interés sean alterados.

Por tal motivo, el diseño, desarrollo e implementación de sistemas autónomos, económicos y con tecnología de software y hardware libres, para el monitoreo confiable de la calidad del agua en tiempo real, ha tomado un gran auge a nivel global en los últimos años. Esto, debido fundamentalmente a una disminución significativa en el costo.

## INTRODUCCIÓN

---

A través de estos sistemas, es posible realizar un seguimiento de los niveles de contaminación que ocurren en los cuerpos de agua dulce, dígame: ríos, lagos, manantiales, embalses, entre otros y enviar advertencias inmediatas al usuario. Esto puede ayudar a prevenir enfermedades causadas por el agua contaminada y con ello favorecer con el cuidado de la salud humana, además de contribuir a la disminución de problemas medioambientales causados por la contaminación de estas extensiones de agua y al cuidado de las especies de la flora y la fauna que habitan en ellas. Asimismo, la obtención de la información precisa y en tiempo real, permitirá a los responsables tomar medidas inmediatas para frenar los niveles de contaminación de un cuerpo de agua específico.

En este sentido, en este proyecto se realizó el diseño y la construcción de un equipo de medición para el monitoreo en tiempo real de pH, temperatura y conductividad eléctrica en el agua, esto basado en software y hardware libres y en la tecnología de Internet de las cosas (*Internet of Things, IoT: por sus siglas en inglés,*).

En primera instancia se desarrollaron e implementaron los sensores de medición de conductividad eléctrica (CE), temperatura (T) y potencial de hidrógeno (pH), después se realizaron las pruebas experimentales en el laboratorio con el fin de validar los sensores, contra sensores comerciales de alta precisión utilizados como patrones de referencia.

Posteriormente se desarrolló la configuración y la conexión electrónica del sistema utilizando una placa de Arduino DUE, además de realizar la programación del microcontrolador para el procesamiento de las señales mediante software (IDE de Arduino). Asimismo, se ejecutó la programación del microcontrolador para la transmisión de los datos medidos inalámbricamente.

Luego se configura una plataforma de IoT, para la visualización, registro y análisis de los datos medidos. Finalmente se construyó el encapsulado del equipo y se determinó la confiabilidad del equipo construido.

En resumen, se construyó un equipo confiable para el monitoreo de conductividad eléctrica, temperatura y pH en agua: utilizando software y hardware libres, confiable y de bajo costo, accesible para cualquier persona que requiera realizar la medición de estos parámetros.

---

## INTRODUCCIÓN

---

---

Al contrastar los resultados obtenidos con el equipo construido contra los resultados observados con los equipos de referencia, demostraron ser similares. Lo que se comprobó mediante pruebas estadísticas

Además, se realizó la programación del microprocesador Arduino para el procesamiento de las señales y para la transmisión de los datos medidos mediante WI-FI hacia una plataforma de IoT para el monitoreo en tiempo real de los parámetros medidos *in situ* con el objetivo de registrar y analizar los comportamientos relacionados con la calidad del agua de un cuerpo de agua específico.

La tesis está estructurada de la siguiente manera: Introducción, Capítulos del I al V, Perspectivas, Referencias Bibliográficas y Anexos.

El Capítulo I “**Fundamentos generales de la investigación**”, se recopila la información técnica básica sobre la investigación, con énfasis en los antecedentes a nivel mundial y nacional de trabajos de investigación sobre calidad del agua. También se analizan trabajos donde se desarrollan sensores para medir los parámetros básicos para definir la calidad del agua. Además, se realiza una exposición de los principales conceptos básicos necesarios para el desarrollo de la investigación.

En el Capítulo II “**Planteamiento general de la investigación**”, se define el problema de la investigación, fundamentándose en la necesidad del desarrollo y generalización de equipos de medición a bajo costo para el monitoreo en tiempo real de la calidad del agua, se justifica el tipo de aportación que se estima obtener, se plantea la hipótesis de la investigación y se define el objetivo general y los específicos.

En el Capítulo III “**Diseño y estrategia metodológica**”, se plantea y fundamenta la metodología a implementar para dar cumplimiento a los objetivos, así como se resume la misma en un diagrama de flujo. También en este capítulo se analizan los materiales y métodos utilizados en el trabajo.

En el Capítulo IV “**Resultados de la investigación**”, se presentan los resultados obtenidos de la implementación de la metodología definida en el capítulo anterior, desde la determinación y el desarrollo de los sensores, hasta la construcción final del equipo. Además, se realiza un análisis

---

---

## INTRODUCCIÓN

---

---

estadístico para la validación de los sensores diseñados comparándolos con sensores patrones de alta exactitud.

En el Capítulo V “**Conclusiones**”, se establecen las conclusiones de la investigación respondiendo a la hipótesis planteada y a los objetivos, general y específicos.

# CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN



## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

### 1.1. ANTECEDENTES

La evaluación de la calidad del agua es una necesidad impetuosa en nuestros días. Desde la década de los 70'sante la necesidad de encontrar un método uniforme y consistente para dar a conocer la calidad del agua de manera accesible a la población, se desarrolló un sistema estimativo de calidad del agua que requirió la medición física de los parámetros de contaminación del agua y el uso de una escala estandarizada de medición para expresar la relación entre la existencia de varios contaminantes en el agua y el grado de impacto en los diferentes usos de la misma.

Este sistema se denominó Índice de Calidad del Agua (ICA) y es un sistema cualitativo que permite hacer comparaciones de niveles de contaminación en diferentes áreas.

A nivel mundial se han desarrollado diferentes ICA, entre los que se destaca el de la National Sanitation Foundation (ICA– NSF), desarrollado por Brown *et al.* (1970) para ríos de Estados Unidos y ampliamente empleado y validado o adaptado en diferentes estudios internacionales (Torres *et al.* 2010).

Éste índice consideró 18 parámetros para su cálculo con distintos pesos relativos ( $W_i$ ), según la importancia que se le concedía a cada uno de ellos en la evaluación total.

Debido al crecimiento poblacional y principalmente el crecimiento industrial, se ha impactado considerablemente en los cuerpos de agua mediante las descargas de las grandes industrias, las cuales vierten una serie de contaminantes tóxicos, tales como los metales pesados y los compuestos orgánicos, que no estaban considerados en el ICA, por lo que la evaluación que se hace actualmente con dicho índice es parcial y no necesariamente corresponde a la realidad (SEMARNAT, 2012).

Con el transcurso de los años se han planteado otros ICA para la evaluación del recurso hídrico destinado al consumo humano, previo al tratamiento, que incluyen parámetros fisicoquímicos y microbiológicos relacionados con el nivel de riesgo sanitario presente en el agua, como por ejemplo el ICA Universal Water Quality Index – UWQI presentado por Boyacioglu (2007) y el Drinking Water Quality Index – DWQI, de la UNEP (2007).

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

En el caso particular de México se han desarrollado varios trabajos de cuantificación del Índice de Calidad de Agua, en diferentes ríos, presas o lagos. Como, por ejemplo: El diagnóstico y la predicción del índice de la calidad del agua de la cuenca del río Amajac, Hidalgo, donde se determinó que el agua es de mala calidad en el 59% de las localidades analizadas (Álvarez *et al.* 2006). Otro ejemplo es la estimación de la calidad del agua de ríos urbanos, específicamente de la subcuenca del río Sordo en Xalapa, Veracruz y donde se concluye que de forma general es de muy mala calidad el agua en toda la subcuenca del río (Olguín *et al.* 2010). También encontramos el análisis del ICA en la presa la Boquilla, Chihuahua, donde se realizaron muestreos mensuales en 6 puntos durante todo el año 2013, concluyendo que el agua de la presa es aceptable para uso agrícola (Rubio *et al.* 2014) y también el estudio realizado en las lagunas de Bustillos y de Los Mexicanos, Chihuahua, humedales de especial interés ambiental que se encuentran amenazados por una fuerte presión de las actividades humanas (Álvarez *et al.* 2016).

Así mismo se pueden encontrar trabajos relacionados con la determinación del índice de calidad del agua en el Estado de Morelos, un ejemplo de ello es el trabajo desarrollado por la Universidad Nacional Autónoma de México, donde determinan la calidad del agua del acuífero Tepalcingo-Axochiapan, Morelos, en el cual se realizan 6 muestreos en 8 pozos de agua potable y un manantial. Se midieron 11 parámetros fisicoquímicos, obteniendo como resultado que, el agua de los pozos y del manantial es muy dura, además de que se confirma que 3 de los pozos son inadecuados como fuente de suministro de agua potable esto debido fundamentalmente a la falta de drenajes y servicios sanitarios en núcleos poblacionales aledaños (Robles *et al.* 2013).

Además, se han desarrollado estudios de monitoreo de calidad del agua de los principales ríos del Estado de Morelos, desarrollados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). El objetivo de estos estudios es efectuar una caracterización de la calidad del agua de los ríos en base a los resultados de campañas de muestreo, y determinar su capacidad de asimilación de contaminantes por tramos en función a la ubicación de las estaciones de muestreo (IMTA, 2014).

Algunos de los problemas detectados en estos estudios están basados principalmente en qué; se realizan 1 o 2 períodos de muestreos al año, lo cual es un número muy bajo ya que la calidad del agua varía en función de las diferentes condiciones que se presentan a lo largo del año. El comportamiento

---

---

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

de los parámetros depende directamente de la variación de factores ambientales, como la precipitación y la temperatura. Estos factores afectan de manera directa la calidad. Otro aspecto que se determinó fue la escasa cantidad de puntos de muestro, lo que no es representativo para estimar la verdadera calidad del agua del río en general. Estos aspectos negativos a la hora de la realización de los estudios se supone que se encuentren en estrecha relación con el bajo presupuesto que presentan estos organismos para estas actividades y a los costos elevados de todas las mediciones que se llevaron a cabo.

El principal uso del agua de los ríos del Estado de Morelos es en la actividad agrícola, por lo que la presencia de contaminantes afecta de forma indirecta a los núcleos poblacionales que consumen los productos cosechados en todas estas cuencas. Además de influir esta contaminación directamente en la conservación de la vida acuática en dichos ríos (IMTA, 2014).

En todos estos trabajos se utilizan diferentes ICA y se miden diferentes parámetros para determinar el índice de calidad del agua en dependencia de la aplicación o del uso del agua en estudio, siendo estos los principales parámetros medidos *in situ*: Turbidez, Potencial de Hidrógeno (pH), Oxígeno Disuelto (OD), Sólidos totales disueltos (TDS), Conductividad Eléctrica (CE) y Temperatura (T).

Igualmente es importante resaltar que la Organización Mundial de la Salud, en el documento “Guías para la calidad del agua potable”, establece que el hecho de tomar una muestra y retirarla de su entorno natural la modifica inevitablemente, en función de los distintos parámetros que la afectan. Algunos de ellos pueden considerarse estables en la escala de tiempo en el que se trabaja y se realizan las medidas necesarias a la hora de la toma de muestras, pero otros parámetros como: temperatura, conductividad, pH, gases disueltos, entre otros, cambian muy rápidamente (OMS, 2006).

Por lo que la OMS recomienda que de ser posible la temperatura, pH, conductividad, alcalinidad, cloro libre residual y oxígeno disuelto sean medidos *in situ* y no solo eso, además de que se debe hacer sistemáticamente (OMS, 2006).

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

Si se cotiza un dispositivo de medición existente en el mercado para realizar las mediciones de las variables fisicoquímicas mínimas *in situ*, este sería de costos muy elevados ya que estos dispositivos comerciales presentan algunas dificultades, debido fundamentalmente a:

- La mayoría de los sistemas comerciales registran datos en un formato encriptado que solo puede decodificarse mediante su software propietario.
- El software requerido para interactuar con el hardware es en sí mismo patentado y 'cerrado'; solo la compañía que vende el software es capaz de mejorar el software o corregir errores, y a menudo el ciclo de desarrollo es lento.
- El hardware de monitoreo de agua comercial típico requiere licencias de hardware especiales para recuperar datos del dispositivo. El hardware de monitoreo en sí mismo es a menudo de alta calidad, pero las modificaciones o el agregado de sensores externos no están permitidos ni son compatibles.

Estas dificultades representan altos costos para poder utilizar estos equipos para el monitoreo de aguas. Por lo que se comienza a expandir una tendencia global del desarrollo de sensores y equipos de medición de los principales parámetros que definen la calidad del agua utilizando hardware y software libres.

El monitoreo de la calidad del agua es una herramienta importante ya que proporcionan datos en tiempo real para la protección del medio ambiente y el seguimiento de las fuentes de contaminación. Sin embargo, el monitoreo continuo de la calidad del agua a alta resolución sigue siendo prohibitivamente costoso (Rao *et al.* 2013).

Con la aparición de equipos de bajo costo que pueden llevar a cabo esta tarea de manera sencilla y sin muchos recursos, es necesario conocer sus aplicaciones, prestaciones y limitaciones que puedan tener para elegir adecuadamente cuál es apto y cuál no para cierta aplicación (González-Ruiz, 2016).

En el marco de la investigación relacionada con el tema calidad del agua un grupo de trabajo de la universidad de Melbourne, Australia; diseña un sistema autónomo de monitoreo de la calidad del agua de bajo costo, utilizando un Arduino Mega 2560 y la transmisión de datos a una estación base

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

(PC) vía USB, donde se almacenan los datos en mySQL (Rao *et al.* 2013). El costo del prototipo para la medición de 6 variables alcanzó los€1040.00, aproximadamente \$1,200.00 dólares, un valor significativamente menor si se compara con los sistemas comerciales de monitoreo de calidad del agua, pero aun elevado para nuestros objetivos.

A partir del año 2013 se extiende el desarrollo de trabajos relacionados con la monitorización de la calidad del agua en el marco de cooperación. Donde se desarrollan los proyectos y se crean repositorios en internet (*ejemplo: GitHub*) donde se muestran los códigos y los avances significativos de cada investigación en particular, y donde se insta a todos los investigadores que quieran cooperar que utilicen los avances obtenidos para optimizar sus resultados y subirlos a la plataforma para apoyar en el desarrollo y la generalización global de estas soluciones a bajos costos (GitHub, 2008).

Un ejemplo representativo de esto es el sistema RIFFLE (*Remote Independent Friedly Field-Logger Electronics*), que es una colección de diseños para un enfoque de código abierto para el monitoreo del agua. Su diseño original era una placa de registro de datos basada en ARM encerrada en PVC; Public Lab ha apoyado el desarrollo de un registrador de datos basado en Atmel328 incluido en una botella de agua (RIFFLE, 2015).

El principal objetivo de sus desarrolladores fue alentar a una gran sociedad de usuarios alrededor del mundo y que se estableciera una comunidad alrededor de dicho dispositivo, para que los usuarios pudieran respaldarse mutuamente, ayudar a depurar el código y compartir nuevos diseños (RIFFLE, 2015).

Entre las principales ventajas que presenta este proyecto además de las ya mencionadas se encuentran:

- Baja potencia. Capaz de monitorear en ubicaciones remotas durante muchos días, semanas, con una batería.
- Formatos de datos abiertos y accesibles. Diseñar el dispositivo para que pueda generar datos en un formato de datos común (CSV), utilizando medios de almacenamiento de datos accesibles (tarjetas SD).

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

- **Materiales accesibles:** El monitor de agua requeriría un recinto a prueba de agua, en la medida posible que fuera práctico, a partir de materiales que pudieran obtenerse localmente, a fin de reducir los costos y mejorar la accesibilidad (figura 1.1).



Figura 1.1: **Proyecto RIFFLE**. Fuente: (RIFFLE, 2015)

La principal desventaja de este proyecto es que su alcance es solamente hasta obtener las mediciones y almacenarlas en una tarjeta SD, no se diseña una solución para la transmisión de los datos en tiempo real. Lo cual con el desarrollo de las comunicaciones en la actualidad y la generalización del concepto de IoT, se queda un poco por debajo de las expectativas ya que se estarían realizando mediciones *in situ*, pero su monitoreo no es en tiempo real.

Otro ejemplo de este tipo de proyectos aún más completo, que, si integra un módulo de comunicación con un servidor para el registro de los datos, es el "Mãe d' água - la madre del agua", un hardware abierto para monitorear la calidad del agua en tiempo real.

El objetivo del proyecto es detectar posibles contaminantes en aguas residuales, como toxinas industriales y metales pesados en el agua. El sistema ayudaría a inferir con precisión las propiedades y variables fisicoquímicas que diferencian al agua contaminada del agua no contaminada (Mãe\_d'\_água, 2015).

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

El dispositivo mide la acidez en agua por energía de hidrógeno (pH), potencial de reducción de oxidación (ORP), conductividad del agua, temperatura del agua y presión barométrica en el nivel del agua, que son factores importantes a considerar cuando se evalúa la calidad del agua (figura 1.2).



Figura 1.2: **Projeto Mãe d' água**. Fuente: (Mãe\_d'\_água, 2015)

Entre las desventajas de este dispositivo es que se desconoce si el equipo finalmente fue probado fuera del laboratorio y que se hayan obtenido los mismos resultados. Además, que no se especifica la fuente de alimentación eléctrica del sistema.

En el año 2016 en correspondencia con el desarrollo de una tesis de grado, se realiza un proyecto en la Universidad Politécnica de Madrid, España vinculado con el monitoreo de la calidad del agua potable con hardware y software libres. El autor realiza un análisis de tres proyectos de avanzada en estos temas y selecciona uno de ellos para modificarlo y ajustarlo a sus necesidades (El-Kouri, 2016).

Es importante aclarar que el autor logra de forma general disminuir significativamente el costo del proyecto, pero no cuenta con la solución adecuada en cuanto a los sensores de medición de conductividad eléctrica, ni del pH, destacado por el mismo autor en sus recomendaciones y además el sistema solo abarca hasta la medición y registro de los datos en una memoria SD, no se realiza la transmisión ni el monitoreo de los datos en tiempo real.

Se podría considerar que este proyecto sería un retroceso en el proceso de avance mostrado en el desarrollo de soluciones de monitoreo en tiempo real, pero el principal análisis que se extrae de esta solución es que es posible continuar disminuyendo costos en nuestras soluciones y obtener resultados

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

satisfactorios en dependencia de la aplicación en cuestión y del presupuesto con que se cuente. El costo total del dispositivo obtenido es alrededor de € 130.00, aproximadamente \$150.00 dólares, un valor aceptable para un equipo de medición de estas características.

A finales del año 2016 se desarrolla un proyecto de monitorización de la calidad de aguas pluviales vertidas a cause público en entornos industriales mediante tecnología Low-Cost. Este trabajo desarrollado para la obtención del título de Maestría en Ingeniería Ambiental, en la escuela técnica superior de ingeniería, Universidad de Sevilla. El autor analiza los parámetros de turbidez, pH, conductividad eléctrica y temperatura en aguas residuales en zonas industriales (González-Ruiz, 2016).

Los resultados obtenidos son satisfactorios, pero se trata solamente de un prototipo con fines académicos, por lo que los sensores utilizados no serían los adecuados a utilizar en el desarrollo del proyecto para uso en entornos industriales como dice su título. Por ello no se puede tomar como referencia los costos de este proyecto ya que la calidad de los sensores utilizados difiere de los sensores más resistentes a ambientes industriales que se tendrían que utilizar.

Asimismo, en dicho proyecto no se especifica la forma de alimentación eléctrica de dicho prototipo, lo que se considera un tema importante para cualquier aplicación de electrónica a desarrollar.

Se realiza el prototipo utilizando un Arduino UNO R3, la última versión de esta placa base de Arduino, la cual presenta avance antes las placas anteriores, pero aun presenta dificultades en la estabilidad de la comunicación inalámbrica y el envío de los datos hacia la plataforma web, su procesador es de 8 bits y la velocidad de reloj es de 16 MHz, inferior al Arduino DUE lo cual lo deja en desventaja en la velocidad del cálculo de las distintas operaciones programadas.

En 2017 varios autores de la Universidad de Sonora, México, desarrollaron un trabajo titulado Monitoreo del Índice de calidad del agua para camaronicultura (cultivo de camarones) por medio de un hardware de acceso abierto y un sistema de inferencia difusa. En este los autores desarrollan un equipo para el monitoreo de pH, temperatura y oxígeno disuelto con el fin de procesar y evaluar las variables fisicoquímicas básicas que afectan el cultivo del camarón. Además de que desarrollan el

---

---



## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

software de inferencia difusa, el cual es el encargado de procesar las distintas variables medidas y brindar una información más sintetizada, que es simplemente el índice de calidad del agua y su estado adecuado o no para el cultivo del camarón (Bórquez-López *et al.* 2017).

Otro ejemplo, es el equipo de medición desarrollado por un grupo de trabajo en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) en 2017, mediante el cual se miden 5 parámetros básicos para determinar la calidad del agua potable (figura 1.3).



Figura 1.3: **Equipo medición calidad del agua desarrollado UAM.** Fuente: (Semanao\_UAM, 2017)

El prototipo posee un sistema central de procesamiento que a partir de una muestra mide la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, la turbidez y la presencia de bacterias patógenas, por lo que con estas cuantificaciones el microcontrolador efectúa una comparación con el rango de concentración establecido en la norma de agua potable para avisar al usuario por medio de un led de color verde si el fluido está dentro del rango y rojo, en caso contrario. Estos datos, así como la fecha y la hora de la medición, son almacenados en la memoria del desarrollo y recuperados por medio de un protocolo de comunicación –vía Bluetooth– que permite transferir el contenido al activar una aplicación a un celular con sistema Android para transmitirlo –junto con la posición GPS del teléfono– a un servidor (Semanao\_UAM, 2017).

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

Dicho dispositivo, según sus autores, tiene un costo aproximado de \$8,000.00 pesos mexicanos, un poco alto considerando los valores estimados para nuestro proyecto, además de que está desarrollado específicamente para determinar la calidad de agua potable y el envío de los datos se hace a través del celular del usuario, lo que limita un poco su uso. Existe muy poca documentación sobre este proyecto y no hay referencias acerca del estado actual del mismo.

### 1.2. MARCO TEÓRICO

#### 1.2.1. Análisis del agua

Cuando se analiza el agua contaminada con el objetivo de ser tratada, es necesario revisar previamente los parámetros que determinen su calidad. Estos parámetros se clasifican, en cuatro grupos: físicos, químicos, biológicos, y radiológicos (Pérez-Garrido *et al.* 2013).

Uno de los parámetros físicos más importantes es la presencia de sólidos que alteran la apreciación visual que tenemos del agua. Los parámetros que evalúan esta presencia son: turbidez, sólidos en suspensión y color.

#### **Turbiedad:**

La determinación de la **turbidez**, la cual es la medida del grado de transparencia que pierde el agua por la presencia de partículas en suspensión, es de gran importancia en aguas para el consumo humano. Los valores de turbidez sirven para determinar el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda y para determinar la potabilidad del agua.

#### **Color:**

El término **color** se define como la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. La presencia de color en las aguas residuales es debida principalmente a la presencia de materia orgánica proveniente de los suelos vegetales, como es el caso de los ácidos húmicos que proporcionan un color amarillento; el hierro que aporta colores rojizos y el manganeso que le proporciona tonalidades negras (Pérez-Garrido *et al.* 2013).

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

### **pH:**

Otra de las variables que se pueden medir de forma *in-situ* con la instrumentación adecuada es el **pH (Potencial de Hidrógeno)**, que no es más que una expresión de la concentración de iones hidrógeno, además brinda una medida de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar los usos específicos del agua (Pérez-Garrido *et al.* 2013). La mayoría de las aguas naturales tienen un pH que varía entre 6 y 8.5, mientras que en las aguas residuales es variable y puede corregirse por neutralización (Martín-Galvín, 2020).

### **Temperatura:**

La medición de la **temperatura** del agua es otro de los parámetros para tener en cuenta, ya que una temperatura demasiado alta facilita el desarrollo de bacterias en el agua. Además, la temperatura es un parámetro determinante a la hora de realizar calibraciones de otros parámetros medidos para determinar los índices de calidad del agua.

### **Oxígeno disuelto:**

Igualmente, la medición de concentración de **Oxígeno Disuelto (OD)** es una prueba clave en la determinación de la contaminación del agua, y en el control del proceso de tratamiento de aguas residuales. En el agua la cantidad de oxígeno disuelto es variable. En aguas naturales y residuales, depende de la actividad física, química y bioquímica del sistema de aguas. En agua pura, a la temperatura ambiente, el oxígeno se disuelve a una concentración aproximada de 8.5 mg/L. La solubilidad disminuye conforme aumenta tanto la cantidad de sólidos disueltos, así como la temperatura (Pérez-Garrido *et al.* 2013).

### **Sólidos Totales Disueltos:**

Otra variable medida son los **Sólidos totales disueltos (STD)**, la cual brinda una medida del contenido combinado de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en un líquido en forma molecular, ionizada o en forma de suspensión micro granular. Esta variable está estrechamente vinculada con la conductividad eléctrica en el agua. Uno de los principales fabricantes de equipos y sensores de medición de parámetros de calidad del agua HANNA INSTRUMENTS establecen que: en soluciones acuosas la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad. Por lo

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

que, dependiendo de las aplicaciones, una relación de 2 a 1 entre los valores de STD en ppm y la variable de conductividad eléctrica expresada en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  es una buena aproximación (HANNA, 2004).

### **Conductividad:**

La **conductividad eléctrica (CE)** es otro de los parámetros fundamentales para el análisis de las aguas, ya que es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es indicativa de la materia ionizable total presente en el agua. La conductividad del agua pura es mínima, mientras que en las aguas residuales presentan valores diversos (Pérez-Garrido *et al.* 2013).

### **1.2.2. Conductividad Eléctrica**

En general, el flujo de electricidad a través de un conductor es debido a un transporte de electrones.

La forma de llevarse a cabo este transporte puede ser de dos tipos, dependiendo de los conductores: conductores metálicos o electrónicos y conductores iónicos o electrolíticos.

Las disoluciones acuosas pertenecen evidentemente a los conductores iónicos o electrolíticos. En ellas la conducción de electricidad al aplicar un campo eléctrico se debe al movimiento de los iones en disolución, los cuales transfieren los electrones a la superficie de los electrodos para completar así el paso de corriente (Pérez-Laguada, 2017).

La conductividad eléctrica del agua se define como la medida de la capacidad de ésta para transportar la corriente eléctrica y permite conocer la concentración de especies iónicas disueltas en su interior (Pérez-Laguada, 2017).

En disoluciones acuosas, puesto que la viscosidad disminuye con la temperatura, la conductividad aumentará a medida que aumente la temperatura.

La determinación de la conductividad es usada en el análisis de agua la cual permite obtener un estimado del contenido de sólidos disueltos, es decir brinda información del grado de mineralización

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

del agua natural, potable, residual, residual tratada, de proceso o bien del agua para ser usada en el laboratorio en análisis de rutina o para trabajos de investigación.

El valor de conductividad es un parámetro regulado por límites máximos permisibles en descargas de aguas residuales al alcantarillado o a lugares receptores, también es un parámetro de calidad del agua para usos y actividades agrícolas, para contacto primario y para el consumo humano. En la tabla 1.1 se muestran valores aproximados de conductividad en diferentes aguas.

Tabla 1.1: **Conductividad eléctrica en diferentes aguas.** Fuente: (Pérez-Laguarda, 2017)

TIPOS DE AGUA	VALORES APROXIMADOS
AGUA ULTRA PURA	0.055 $\mu\text{S}/\text{cm}$
AGUA DESTILADA	0.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$
AGUA DE MONTAÑA	1 $\mu\text{S}/\text{cm}$
AGUA DOMÉSTICA	500 - 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$
AGUA POTABLE VALOR MÁXIMO	1055 $\mu\text{S}/\text{cm}$
AGUA DE MAR	56000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
AGUA SALOBRE	100000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

La medición se basa en el principio del puente de Wheatstone, utilizándose un aparato diseñado a tal efecto, llamado conductímetro.

### Principio de funcionamiento según Norma (NMX-AA-093-SCFI-2000).

Este método se basa en la propiedad que adquiere el agua de conducir la corriente eléctrica cuando tiene iones disueltos.

La conducción de la corriente eléctrica en agua, puede explicarse por medio de la disociación electrolítica. Cuando se disuelve en agua un ácido, una base o una sal, una porción se disocia en iones positivos y otra en negativos



## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

Los iones se mueven independientemente y se dirigen a los electrodos de carga opuesta mediante la aplicación de un campo eléctrico.

La cantidad de moléculas que se han disociado depende de la concentración de la solución. Las soluciones, al igual que los conductores metálicos obedecen a la Ley de Ohm, excepto en voltajes muy elevados y corrientes de frecuencia muy alta.

Si en una solución electrolítica se colocan dos electrodos de área  $A$  separados por una distancia  $d$ , y se aplica un campo eléctrico  $E$ , la diferencia de potencial  $V$  entre los electrodos será proporcional a la distancia  $d$  y al campo eléctrico  $E$ .

$$V = d * E \quad (1.1)$$

Donde:

$V$  es la diferencia de potencial entre los electrodos en volts;

$E$  es el campo eléctrico aplicado en ampere (A)

$d$  es la distancia de separación entre las placas en cm.

La conductancia específica o conductividad  $\sigma$  es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica y está definida por la relación:

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (1.2)$$

Donde:

$J$  es la densidad de corriente, y

$E$  es el campo eléctrico

La densidad de corriente  $J$  se define a su vez por la ecuación:

$$J = \frac{I}{A} \quad (1.3)$$

Donde:

$I$  es la intensidad de corriente, y

$A$  es el área.

Combinando las ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.3 se obtiene que la diferencia de potencial  $V$  es:

$$V = \frac{(I*d)}{A*\sigma} \quad (1.4)$$

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---



---

Si se tiene en cuenta la Ley de Ohms se puede afirmar que el valor  $\frac{d}{\sigma * A}$  se le conoce como la resistencia que presenta la disolución al paso de la corriente y se denota por la letra R.

$$R = \frac{d}{\sigma * A} \quad (1.5)$$

De la ecuación 1.5 se obtiene que las unidades de la conductancia específica son:

$$\sigma = \frac{d}{R * A} = \frac{cm}{ohm * cm^2} = \frac{1}{ohm * cm} = \frac{Siemen}{cm}$$

La ecuación 1.5 permite el cálculo de la conductancia específica de la disolución conociendo su resistencia y las dimensiones de la celda de conductividad.

Se define como constante K de la celda de conductividad a la relación existente entre la distancia de los electrodos d y su área A

$$K = \frac{d}{A} \quad (1.6)$$

Por lo que la fórmula de conductividad está dada por:

$$\sigma = \frac{K}{R} \quad (1.7)$$

Una vez medida la resistencia de la solución o su inverso la conductividad y conociendo la constante de la celda se conoce la conductancia específica de la solución  $\sigma$ .

Un aspecto a tener en cuenta es la temperatura de la muestra, ya que la conductividad está estrechamente relacionada con la temperatura.

Para comparar la conductividad a través de líquidos a diferentes temperaturas, se usa el concepto de "conductividad específica", es decir, la conductividad del líquido a "25°C". La dependencia de la temperatura de la conductividad depende de la mezcla particular de iones en la solución, por lo que los parámetros de corrección y las ecuaciones utilizadas para cambiar la conductividad medida al valor esperado a 25 °C deben elegirse adecuadamente para la composición química esperada de la solución.

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

Por lo general, se utiliza la corrección lineal más simple para el efecto de la temperatura sobre la conductividad:

$$C_{25} = \frac{Ct}{1+\alpha(t-25)} \quad (1.8)$$

Donde

t es la temperatura de la muestra,

$C_{25}$  es la conductividad calculada a 25 °C,

$C_t$  es la conductividad medida a temperatura t,

$\alpha$  es un coeficiente de temperatura elegido para ser apropiado para el contenido esperado de iones de la solución que se está probando.

*Nota: (Para las soluciones diluidas de la mayoría de las sales,  $\alpha = 0.019$ , una aproximación bastante buena, se pueden elegir mejores valores si se conoce más información sobre el contenido de la solución).*

### 1.2.3. Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. Indica la concentración de iones de hidrógeno  $H^+$  presentes en determinadas disoluciones. En la mayoría de las sustancias presentes en la naturaleza, estas concentraciones son muy bajas y expresarlas en forma decimal o exponencial resulta engorroso, y con frecuencia es fuente de errores (Pérez-Laguarda, 2017).

En el año 1909, el químico danés Sören Sörensen propuso una alternativa para la expresión de la concentración de  $H^+$ . Sugirió que; en lugar de usar números en forma decimal o exponencial, se empleara una transformación logarítmica de la concentración molar de protones a la que denominó pH y definió matemáticamente como:

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]} = -\log[H^+] \quad .9)$$

Como resultado de esta transformación, los números fraccionarios se convierten en números enteros positivos, y como es inversa, mientras mayor sea la concentración de  $H^+$ , el valor del pH es menor.

Este aspecto indica la importancia de regular correctamente el valor del pH en el agua, ya que una simple variación de 1 en la escala de pH, representa un cambio de diez veces en la concentración de  $H^+$  en el agua (Pérez-Laguarda, 2017).



## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

La medición del pH del agua es de gran importancia ya que los valores altos y bajos de pH son tóxicos para organismos acuáticos. Además, en el agua de consumo valores extremos de pH pueden provocar irritaciones de la mucosa y órganos internos e incluso procesos de ulceración. Asimismo, altos valores de pH en aguas de consumo están asociados a aguas coloreadas y con presencia de sabores y olores, por lo cual no son del gusto del consumidor (Martín-Galvín, 2020).

Dicha medición se basa en la capacidad de respuesta del electrodo de vidrio ante soluciones de diferente actividad de iones  $H^+$ . La fuerza electromotriz producida en el electrodo de vidrio varía linealmente con el pH del medio. Se debe tener en cuenta la temperatura de la muestra ya que esta fuerza electromotriz afecta al valor del pH (Alméciga-Gómez y Muñoz-Martínez, 2013).

Tabla 1.2: Escala de valores de pH y ejemplos. Fuente: (Pérez-Laguarda, 2017)

REACCIÓN	pH	EJEMPLO
<b>ÁCIDA</b>	0	Ácido de baterías
	1	Ácido sulfúrico
	2	Zumo de limón o vinagre
	3	Zumo de naranja o bebida gaseosa
	4	Lluvia ácida
	5	Lluvia limpia
<b>NEUTRA</b>	6	Lago saludable o leche
	7	Agua destilada
	8	Agua de mar
<b>BÁSICA</b>	9	Bicarbonato de sodio
	10	Detergente
	11	Amoníaco
	12	Agua jabonosa
	13	Blanqueador
	14	Líquido limpiador de cañerías

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

Según Normas Oficiales Mexicanas la NOM-127-SSAI-1994 establece que para agua potable el pH debe encontrarse entre 6.5 y 8.5 unidades de pH, y en el caso de aguas residuales tratadas la NOM-002-SEMARNAT-1996 establece el rango permitido entre 5.5 a 10 unidades de pH, tabla 1.2.

Existen varios métodos para la medición del pH de una sustancia. El primero en usarse fue el método colorimétrico, el cual es el más sencillo y utiliza sustancias llamadas indicadores de pH que se pueden encontrar en diferentes presentaciones con propiedades particulares para medir rangos de pH específicos (Alméciga-Gómez y Muñoz-Martínez, 2013).

Aunque los papeles tornasol son muy prácticos, si se trabaja con soluciones turbias o coloreadas los datos pueden perder precisión porque fácilmente se puede enmascarar el color, en estos casos es mejor optar por el método potenciométrico (Alméciga-Gómez y Muñoz-Martínez, 2013).

### **Principio de funcionamiento según Norma (NMX-AA-008-SCFI-2016)**

Los medidores de pH potenciométricos miden el voltaje entre dos electrodos y muestran el resultado convertido en el valor de pH correspondiente. Se compone de un simple amplificador electrónico y un par de electrodos.

Por lo general, tiene un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia, o un electrodo de combinación. Los electrodos, o sondas, se insertan en la solución a ensayar.

El diseño de los electrodos es la parte clave: Se trata de estructuras de varilla, normalmente hechas de vidrio, con una bombilla que contiene el sensor en la parte inferior. El electrodo de vidrio para medir el pH tiene una bombilla de vidrio diseñada específicamente para ser selectiva a la concentración de iones de hidrógeno. En inmersión en la solución a ensayar, los iones hidrógeno en la solución de ensayo cambian por otros iones cargados positivamente en el bulbo de vidrio, creando un potencial electroquímico a través del bulbo. El amplificador electrónico detecta la diferencia de potencial eléctrico entre los dos electrodos generados en la medición y convierte la diferencia de potencial en unidades de pH.

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

El valor de pH de una medición depende de la temperatura debido al equilibrio de disociación. Por lo tanto, la temperatura de la muestra siempre debe ser reportada en conjunto con el pH de la muestra.

### 1.2.4. Temperatura (T)

Es una propiedad de la materia que está relacionada con la sensación de calor o frío que se siente en contacto con ella. Cuando se toca un cuerpo que está a menos temperatura que el nuestro se siente una sensación de frío, y al revés de calor. Sin embargo, aunque tengan una estrecha relación, no se debe confundir la temperatura con el calor (Çengel y Boles, 2009).

Cuando dos cuerpos, que se encuentran a distintas temperaturas, se ponen en contacto, se produce una transferencia de energía, en forma de calor, desde el cuerpo caliente al frío, esto ocurre hasta que las temperaturas de ambos cuerpos se igualan. En este sentido, la temperatura es un indicador de la dirección que toma la energía en su tránsito de unos cuerpos a otros (Çengel y Boles, 2009).

### **Instrumentos o termómetros que indican expansiones o fuerzas proporcionales en los cambios de temperatura:**

Las expansiones o fuerzas proporcionales a los cambios de temperatura, dentro de la gama de construcción y calibración del instrumento, son registradas por sistemas amplificadores mecánicos, eléctricos, electrónicos o combinación de ellos, para obtener las lecturas de temperatura.

### **Termómetro:**

Instrumento que usualmente se pone en contacto con la sustancia cuya temperatura desea conocerse hasta que se alcance el equilibrio térmico. Dicho dispositivo, cuando está correctamente calibrado, permite obtener indirectamente el valor de temperatura, midiendo el cambio de alguna propiedad de un constituyente del mismo termómetro que varía monótonicamente con la temperatura (Webster G. J y Eren H, 2014).

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

### **Termómetro de vidrio con columna de mercurio:**

Termómetro que se basa en la dilatación del mercurio líquido para indicar la temperatura. Consta básicamente de un bulbo de vidrio que contiene el mercurio, soldado a un tubo capilar de vidrio de diámetro uniforme, graduado y sellado en su otra extremidad (Webster G. J y Eren H, 2014).

### **Termómetro de resistencia de platino:**

Termómetro que se basa en la variación de la resistencia de un sensor, constituido por un hilo de platino, en función de la temperatura. (Termorresistencia) (Webster G. J y Eren H, 2014).

### **Termómetro de termistor:**

Termómetro que se basa en la medición de la variación de resistencia de un sensor, constituido por un elemento semiconductor, en función de la temperatura. El termistor se utiliza en el intervalo de temperatura en el que la resistencia del elemento semiconductor disminuye monotónicamente cuando la temperatura se incrementa (Webster G. J y Eren H, 2014).

### **Termómetro de termopar:**

Termómetro que se basa en el cambio de la diferencia de potencial que se establece en un termoelemento constituido por la soldadura entre dos metales o aleaciones metálicas diferentes cuando cambia la temperatura de la soldadura. El termopar se constituye por la asociación de dos termoelementos cuyas soldaduras se encuentran a temperaturas distintas (Webster G. J y Eren H, 2014).

### **Principio de funcionamiento según Norma (NMX-AA-007-SCFI-2013)**

El principio se basa en las propiedades de los materiales de dilatarse o contraerse con los cambios de temperatura o en las propiedades eléctricas de los mismos con los que se realizará la medición; estas propiedades son siempre las mismas para una temperatura dada, lo que permite graduar los instrumentos de medición.

Expresa el grado de calor del agua. Existen relaciones entre temperatura, conductividad y pH del agua. La temperatura de un agua potable debe estar entre 10 y 22 °C, fuera de este rango de temperatura, el líquido puede ocasionar problemas gastrointestinales

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

La temperatura del agua es un factor de gran importancia para el desarrollo correcto de los seres vivos que se encuentren en su interior, un cambio brusco en la temperatura puede ocasionarles grandes daños, por eso es de vital importancia garantizar una estabilidad de la temperatura.

### 1.2.5. Arduino

Arduino es una compañía de software y hardware abierto, así como un proyecto y comunidad internacional que diseña y manufactura placas de desarrollo de hardware para construir dispositivos digitales y dispositivos interactivos que puedan detectar y controlar objetos del mundo real. Arduino se enfoca en acercar y facilitar el uso de la electrónica y programación de sistemas embebidos en proyectos multidisciplinarios (Pizarro-Peláez J, 2019).

Un software abierto no es más que el software que se distribuye junto con su código fuente, y con una licencia de su uso, además de poder estudiarlo, corregirlo, mejorarlo y adaptarlo a cualquier necesidad, adicionalmente, puede utilizarse para cualquier propósito y se tiene el derecho de redistribuirlo, siempre que preserve su carácter abierto (Gómez y Gómez, 2011).

En cuanto a hardware abierto se refiere a diseños de libre distribución y el cual persigue no solamente hacer más accesible esa información, sino el promover y dotar de marco jurídico al diseño libre con el fin de proteger y alentar a todos los desarrolladores de hardware (Gómez y Gómez, 2011).

El proyecto tiene sus orígenes en el proyecto Wiring, cuando estudiantes del Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea, Italia, en el 2003 se unieron con el fin de facilitar el acceso y uso de la electrónica y la programación. El objetivo principal en ese entonces era que los estudiantes de electrónica tuviesen una alternativa más económica a las populares BASIC Stamp, unas placas que por aquel entonces valían más de cien dólares, y que no todos podían adquirir (Arduino, 2018).

El resultado fue Arduino, una placa con todos los elementos necesarios para conectar periféricos a las entradas y salidas de un microcontrolador, y que puede ser programada tanto en Windows como macOS y GNU/Linux. En el año 2005 sale al mercado la primera placa de Arduino con carácter

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

comercial, ofreciendo un bajo costo económico y facilidad de uso para novatos y profesionales (Arduino, 2018).

Hoy en día existen más de 20 modelos distintos de placas la mayoría constan de un microcontrolador AVR Atmel-8 bits, cada microcontrolador consta de diversas cantidades de memoria flash, pines y funciones. Las placas utilizan pines hembras de una o dos hileras que facilitan las conexiones e incorporación en otros circuitos.

Las placas Arduino pueden conectarse con módulos adicionales denominados *shields*, dichos *shields* aumentan las características técnicas de la placa Arduino en uso, debido a que poseen circuitos específicos que añaden funcionalidades extras a la placa. La mayoría de estos *shields* se conectan a través de un bus serie I<sup>2</sup>C, aunque existen también aquellas que emplean conexión mediante el bus UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) así como con el bus SPI (Serial Peripheral Interface) (Arduino, 2018).

### 1.2.6. Comunicaciones inalámbricas

La comunicación inalámbrica o sin cables no es más que un tipo de comunicación en la que el emisor y el receptor no se encuentran unidos por un medio de propagación físico, sino que se utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del espacio. En este sentido, los dispositivos físicos sólo están presentes en los emisores y receptores de la señal, entre los cuales se encuentran: antenas, computadoras portátiles, teléfonos móviles, entre otros (Gralla P, 2007).

La tendencia a la movilidad y la ubicuidad hacen que cada vez sean más utilizados los sistemas inalámbricos, y el objetivo es ir evitando los cables en todo tipo de comunicación, no solo en el campo informático sino en televisión, telefonía, seguridad, domótica, entre otros.

Hoy en día las comunicaciones inalámbricas están presentes en todos lados. Principalmente, hay tres tipos de ondas que se usan para establecer dichas comunicaciones: las infrarrojas, las microondas, y las de radio (Gralla P, 2007).

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

El Wi-Fi es un tipo de comunicación por ondas de corto alcance que tienen como principal finalidad la comunicación entre un router inalámbrico y un dispositivo al que se le quiere dar acceso a dicho router.

Es una tecnología que permite la interconexión inalámbrica de dispositivos electrónicos. Los dispositivos habilitados con Wi-Fi pueden conectarse entre sí o a internet a través de un punto de acceso de red inalámbrica. En abril de 2000 WECA certifica la interoperabilidad de equipos según la norma IEEE 802.11b, bajo la marca Wi-Fi. Esto quiere decir que el usuario tiene la garantía de que todos los equipos que tengan el sello Wi-Fi pueden trabajar juntos sin problemas, independientemente del fabricante de cada uno de ellos (Gralla P, 2007).

### 1.2.7. ThingSpeak

Es una plataforma de aplicaciones de código abierto de Internet de las Cosas (IoT) y API para almacenar y recuperar datos de cosas mediante el protocolo HTTP a través de Internet o mediante una red de área local. ThingSpeak permite la creación de aplicaciones de registro de sensores (González-Ruiz, 2016).

Para el presente trabajo se propone utilizar la red abierta ThingSpeak debido fundamentalmente a que esta plataforma brinda grandes ventajas ya que:

- Es una plataforma Open Source.
- Es fácil su configuración.
- Dispone de una integración sencilla con aplicaciones de terceros.

Y el motivo fundamental es debido a su compatibilidad con Arduino y que el conjunto formado por Arduino-ThingSpeak, garantiza un sistema *Low-cost* (González-Ruiz, 2016).

La plataforma ThingSpeak almacena los datos en “Canales ThingSpeak”. Los canales se representan como una interfaz web donde se publican los datos almacenados. Pueden ser configurados para ser públicos para que otras personas puedan verlos o privados, sólo se puede acceder mediante el registro en ThingSpeak.com con cuenta de usuario (González-Ruiz, 2016).

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS

---

---

En un canal se pueden registrar hasta 8 variables medidas, almacenando los datos por un tiempo limitado, dicha plataforma tiene un soporte integrado al software computación numérica MATLAB de MathWorks. Además, que la plataforma viene diseñada para una fácil exportación de los datos a Excel o a Matlab, permitiendo consigo una fácil gestión y uso de los datos almacenados.



# CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

## CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO GENERAL

---

---

### 2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento de la población, la intensificación de la agricultura, la urbanización y la producción industrial han tenido un crecimiento desmesurado en los últimos años a nivel global, impactando negativamente en la cantidad y calidad del agua dulce, disponible para las necesidades básicas de la población (Ramakrishnaiah *et al.* 2009). El uso del agua ha venido en aumento en aproximadamente un 1% anual a nivel mundial desde los años 80. Según estudios se espera que este aumento continúe a un ritmo parecido hasta el 2050, lo que representa un incremento del 20 al 30% por encima del nivel actual de uso del agua dulce a nivel global, debido principalmente al aumento de la demanda en los sectores industrial y doméstico (WWDR\_UNESCO, 2019).

Este aumento en la demanda del agua dulce en el mundo durante las últimas décadas ha traído consigo la concientización por parte de múltiples organismos a nivel global. De esta forma, en julio del 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas, reconocen de manera explícita el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable es esencial en la realización de todos los derechos humanos (El-Kouri, 2016). El objetivo planteado es hacer cumplir ese derecho en todos los países, sin importar el grado de desarrollo, incentivando a los estados a que dedicasen parte de su presupuesto a esta importante causa.

Como se planteó en el objetivo # 6 del informe de Desarrollo Sostenible (2018, p. 7):

*Aún son muchas las personas sin acceso a suministros de agua e instalaciones de saneamiento gestionados de manera segura. La escasez de agua, las inundaciones y la falta de gestión adecuada de las aguas residuales menoscaban el desarrollo social y económico. Es crucial un aumento del uso eficiente de los recursos hídricos y la mejora de su gestión para equilibrar las crecientes y concurrentes demandas de agua de numerosos sectores y usuarios.*

Y no solo desde el punto de vista del cuidado de la salud humana ni de las afectaciones en el desarrollo social o económico, también se debe tener en cuenta las afectaciones desde el punto de

## CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO GENERAL

---

---

vista ambiental que representa una mala calidad del agua de nuestros ríos, lagos y embalses para y con las especies de la flora y la fauna que habitan en ellos.

Debido a lo anterior es que se deriva la importancia que representa en la actualidad un correcto monitoreo y supervisión de los parámetros básicos de medición *in situ* que permiten determinar un índice de calidad del agua.

En los últimos años se han desarrollado, en el marco de proyectos de cooperación en el ámbito académico de distintas universidades en el mundo, algunos trabajos relacionados con la supervisión y el monitoreo de la calidad del agua, utilizando generalmente software y hardware abiertos, con el objetivo de que otros autores los puedan replicar en la creación de otros proyectos con la misma temática y fundamentalmente implementarlos en países en vías de desarrollo y siempre teniendo en cuenta el factor bajo coste.

Como ejemplos representativos de estos proyectos se tienen el RIFFLE (*Remote Independent Friedly Field-Logger Electronics*) y el MÁE D' ÁGUA (*Water's Mother*) por solo citar dos ejemplos.

Entre los aspectos más importantes que diferencian estos proyectos esta la determinación de parámetros a analizar y sobre todo que sensores implementar en la medición de los mismos, ya que esto determina los rangos de medidas y las precisiones que se van a obtener en las mediciones dependiendo de la funcionalidad específica del sistema.

La medición de la conductividad eléctrica (CE), la temperatura (T) y el potencial de hidrógeno (pH) en el agua, son junto a otros parámetros como la turbidez, el oxígeno disuelto (OD), los sólidos totales disueltos (STD), entre otros, parámetros de medición *in situ*, fundamentales para tener en cuenta en la mayoría de los índices de calidad del agua (ICA) más utilizados en la actualidad.

A pesar de la existencia y de la variedad de medidores profesionales que pueden medir todos estos parámetros, los precios son bastante altos e inaccesibles para la mayoría de los usuarios, convirtiéndose lo planteado con anterioridad en una problemática sobre todo para países en vías de

## CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO GENERAL

---

---

desarrollo, ya que; si existe la solución para medir la calidad de sus aguas, pero es demasiado costosa e imposible de obtenerla para la mayoría.

Esto ha llevado a que algunos investigadores hayan propuesto el diseño y desarrollo de equipos de medición *in situ* de algunos parámetros de calidad del agua, con la utilización de hardware y software libres; con el fin de abaratar costos en sus soluciones y mantener una precisión y una exactitud adecuada en sus mediciones.

Otro problema en la actualidad es la falta de bibliografía y documentación relacionada con el desarrollo de este tipo de soluciones; desde el desarrollo de los sensores, la utilización de hardware y software abiertos y el acoplamiento a una placa base Arduino, de costo accesible, logrando la medición y transmisión de los datos inalámbricamente a una plataforma de internet de las cosas donde se puedan almacenar y procesar en tiempo real dichos datos.

Por lo que se decide investigar en el tema, utilizando los avances obtenidos por otros autores, analizando sus recomendaciones he intentado solucionar algunos de los problemas detectados por ellos.

### 2.2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, más del 70% de las aguas residuales que se generan a nivel mundial son devueltas al medio ambiente (ríos, mares o tierras), sin ningún tratamiento previo. Esto impacta negativamente en la salud pública, los recursos naturales y los ecosistemas. Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2019), se calcula que unas 842,000 personas mueren cada año de diarrea como consecuencia de la insalubridad del agua, de un saneamiento insuficiente o de una mala higiene de las manos. Por lo que el monitoreo en tiempo real de la calidad del agua mediante equipamiento de bajo costo tendría una contribución significativa para intentar disminuir estas cifras tan alarmantes.

El desarrollo de la automatización *Low-Cost* y *Open Source*, además, de la generalización del concepto de IoT, permiten encontrar soluciones novedosas y de gran impacto económico, social y ambiental a problemas de la vida cotidiana.

## CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO GENERAL

---

---

Al realizar mediciones *in situ* y en tiempo real en una fuente de agua, de manera continua, permitirá determinar a grandes rasgos el estado de la calidad del agua, logrando determinar con prontitud cuando dicha fuente de agua está siendo contaminado por actividades antropogénicas. El diseño de un equipo portátil, de bajo costo y preciso, puede contribuir con los planes de desarrollo gubernamental para enseñar a la población a que se responsabilice de las condiciones mínimas de salubridad que debe tener el agua empleada para actividades humanas, en las comunidades en las que se esté monitoreando.

El monitoreo completo de los parámetros de calidad del agua dependiendo del uso que se le da permitirá impedir la contaminación directa o indirecta de los núcleos poblacionales de la región cercana al monitoreo, así como para la protección de la vida acuática (PVA) y de otras especies tanto de la flora como de la fauna que dependan de esta fuente de abasto para su desarrollo.

En este proyecto se desarrolló un sistema de medición de parámetros fisicoquímicos del agua, a través de sensores, de bajo costo, confiables que utilicen hardware y software libre. Además, se pretende acoplar estos sensores con una placa base Arduino y desarrollar la programación de este microcontrolador, para el escalamiento de las variables medidas y la transmisión de estas mediante conexiones inalámbricas hacia una aplicación en la web, con el objetivo de poder brindar datos que sirvan para el análisis de tendencias de los diferentes parámetros y brindar una caracterización general de la calidad del agua analizada.

El sistema permitirá obtener información inicial para después realizar análisis más precisos en el laboratorio y conocer los valores exactos de los parámetros que determinan la calidad del agua analizada. Dígase en fuentes de agua potable como manantiales o fuentes de agua a núcleos urbanos, además en fuentes de agua dulce como ríos o lagos, así como en las descargas de aguas de plantas tratadoras, con el fin de monitorear la calidad de salida de dichas plantas.

En la actualidad existen varios fabricantes que presentan soluciones para este tipo de aplicaciones, pero todas ellas son demasiado costosas, por lo que no están al alcance de la mayoría de las personas. Como ejemplo de lo anterior se puede citar el medidor portátil multi-paramétrico de calidad de agua HI 9829 del fabricante Hanna Instruments, en sus diferentes modelos, los cuales miden y registran

## CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO GENERAL

---

---

alrededor de 15 parámetros de calidad del agua y cuyo precio aproximado ronda los € 4,000.00, según catálogos del fabricante (Hanna\_Instruments, 2019).

Otro ejemplo de un medidor más económico del mismo fabricante es el HI 9811-5, un medidor combinado portátil, el cual con una sola sonda mide pH, Conductividad, TDS y Temperatura en medio acuoso, con una muy buena precisión y cuyo costo aproximado de venta ronda alrededor de los € 300.00, según catálogos del fabricante Hanna Instruments. Dicho equipo cuenta con la medición de los parámetros *in situ* y muestra los valores medidos en una pantalla LCD, seleccionando mediante botones, la variable que se desea mostrar. El medidor no cuenta con registro, ni con envío de datos para su almacenamiento o monitoreo en tiempo real (Hanna\_Instruments, 2019).

Como se evidencia el costo de los equipos para el monitoreo de calidad del agua son bastante elevados hasta en sus versiones más sencillas. Por lo que el desarrollo de un equipo de medición de la calidad del agua en tiempo real con hardware y software libres y de bajo costo, contribuiría a la generalización de esta importante actividad y a todos los beneficios que esto conllevaría para la población y para la protección del medio ambiente.

### 2.3. HIPÓTESIS

Mediante el uso de equipo tecnológico de bajo costo, con hardware y software libre, será posible desarrollar un sistema de medición confiable y eficiente para determinar la conductividad eléctrica (CE), temperatura (T) y potencial de hidrógeno (pH) en muestras de agua. Además de transmitir estos datos de forma inalámbrica a una plataforma de IoT, donde sea posible su análisis y procesamiento en tiempo real.

### 2.4. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un equipo de medición de software y hardware abiertos y de bajo costo para el monitoreo en tiempo real de variables determinantes en la calidad del agua.

## CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO GENERAL

---

---

### 2.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar un sensor de conductividad eléctrica (CE).
2. Desarrollar un sensor de temperatura (T).
3. Desarrollar un sensor de potencial de hidrógeno (pH).
4. Realizar pruebas experimentales con diferentes calidades de agua para validar los sensores estadísticamente contra sensores comerciales.
5. Implementar la programación del microprocesador Arduino y configurar la interfaz de comunicación para la transmisión de los datos.
6. Implementar el circuito para la alimentación del sistema utilizando un panel solar y baterías recargables.
7. Configurar la plataforma IoT para el procesamiento y el análisis de los datos medidos.

# CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGIA EXPERIMENTAL



## CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

### 3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental propuesto para evaluar los tres sensores implementados en la solución es básicamente la comparación pareada de las mediciones obtenidas con ellos, contra mediciones realizadas con sensores comerciales de alta precisión y exactitud utilizados como patrones.

La estrategia utilizada para la validación del sensor de temperatura, se basa fundamentalmente en la medición de distintas muestras de agua a diferentes temperaturas (en el intervalo de trabajo que nos interesa para la aplicación) con ambos sensores, es decir con el sensor desarrollado con el equipamiento a bajo costo, y con un termómetro de vidrio comercial el cual es utilizado como patrón. Realizando las mediciones al menos para tener dos réplicas, tabla 3.1.

Tabla 3.1: **Medición de temperatura.** Fuente: Elaboración propia.

Muestras de Agua.	Sensor desarrollado con Arduino.		Termómetro de vidrio utilizado como patrón.	
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

En el caso de la validación del sensor de pH. Se utilizó una estrategia similar lo que en este caso solo se realizaron mediciones en tres muestras buffer con el pH (4.01, 7.01 y 10.01), y analizando la variación de la temperatura en dichas mediciones. Igualmente se realizó la comparación de los valores obtenidos con ambos sensores para las 3 muestras a diferentes temperaturas con al menos dos réplicas para cada medición, tabla 3.2.

## CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

Tabla 3.2: **Medición de pH.** Fuente: Elaboración propia.

T	Réplicas	Sensor desarrollado con Arduino			Sensor Mi 150 Martini Instruments		
		Muestras					
		1	2	3	1	2	3
10°C	1						
	2						
15°C	1						
	2						
20°C	1						
	2						
25°C	1						
	2						
30°C	1						
	2						
35°C	1						
	2						
40°C	1						
	2						

En el caso de la validación del sensor de conductividad. Se utilizó una estrategia similar al sensor de pH, se realizaron mediciones en cuatro muestras de agua a diferentes niveles de conductividad, teniendo en cuenta la variación de la temperatura en dichas mediciones, con el objetivo de implementar en el equipo una compensación de temperatura mediante software. Igualmente se realizó la comparación de los valores obtenidos con ambos sensores para las cuatro muestras a diferentes temperaturas, obteniendo al menos dos réplicas para cada medición, tabla 3.3.

## CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

Tabla 3.3: **Medición de conductividad.** Fuente: Elaboración propia.

T	Réplicas	Sensor desarrollado con Arduino				Sensor DOS-120W Microprocesador Conductivity Meter			
		Muestras							
		1	2	3	4	1	2	3	4
15°C	1								
	2								
20°C	1								
	2								
25°C	1								
	2								
30°C	1								
	2								
35°C	1								
	2								

### 3.2. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL.

La estrategia experimental comenzó con un estudio bibliográfico relacionado con el tema, con el propósito de obtener información de trabajos realizados con anterioridad y poder utilizar sus avances, así como trabajar en las problemáticas detectadas y sus recomendaciones. Como siguiente paso se desarrollaron tres sensores; de conductividad eléctrica, de temperatura y otro de pH, utilizando equipamiento de bajo costo, pero que permita mantener una exactitud y precisión adecuada. Dichos sensores fueron calibrados y validados mediante la comparación pareada con sensores profesionales, utilizados como patrones de referencia. Posteriormente se configuró y programó el microcontrolador para la medición de estos parámetros utilizando software y hardware libres, además se programó la comunicación inalámbrica de los datos, permitiendo la transmisión de estos en tiempo real a una plataforma de IoT, donde se realizará el análisis y procesamiento de los datos, figura 3.1.

## CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

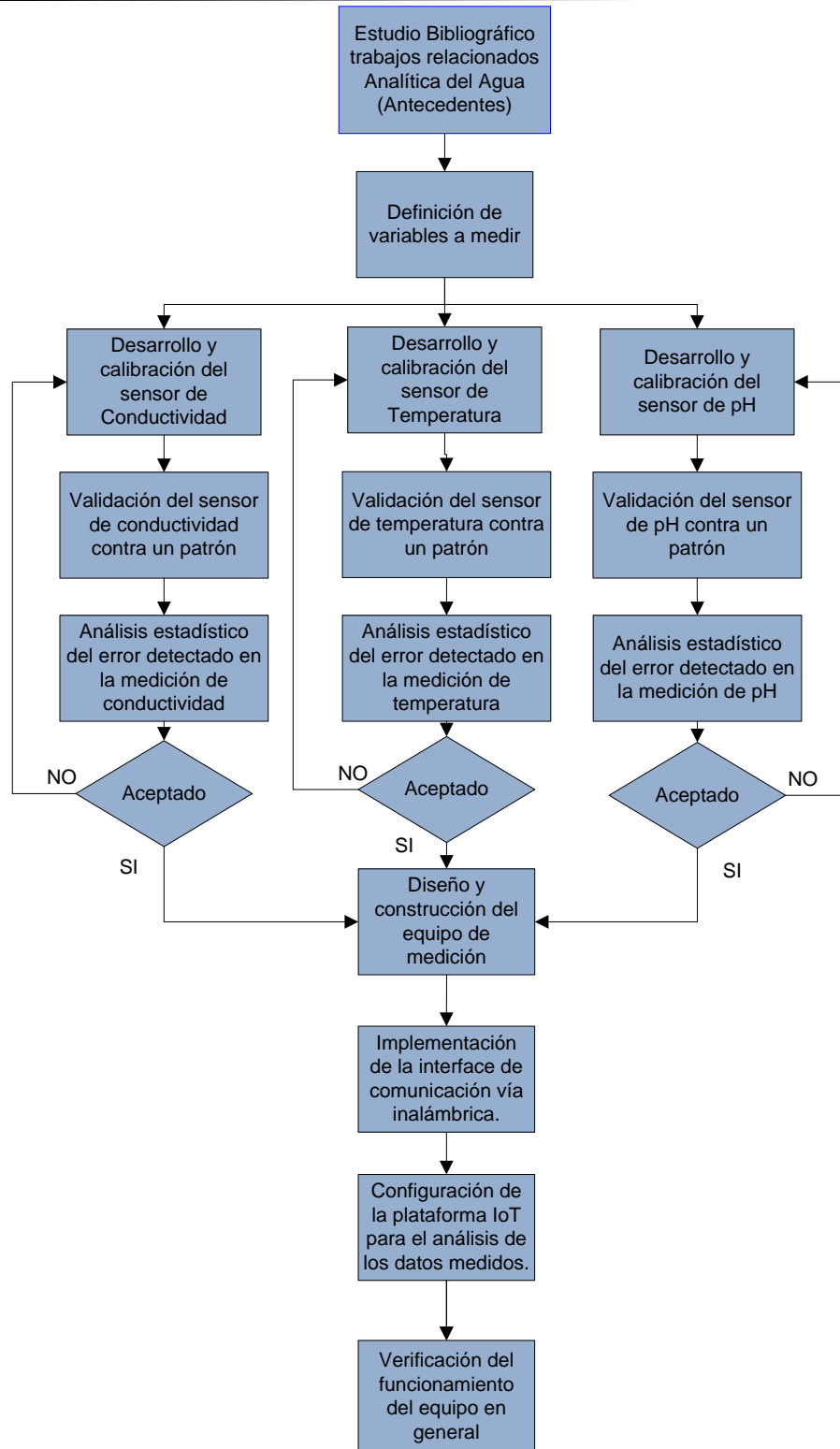


Figura 3.1: Estrategia experimental para el desarrollo del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGÍA EXPERIMENTAL

### 3.3. MATERIALES Y MÉTODOS.

Dentro de los materiales utilizados se definió el uso de la placa de desarrollo de hardware **Arduino DUE**, la cual presenta un micro de 32 bits y la velocidad del reloj es de 84 MHz. Cuenta con 54 entradas salidas digitales y 12 entradas analógicas, suficientes para la aplicación en cuestión y futuras ampliaciones. Además, en diferencia con otras versiones de Arduino como UNO o MEGA, dicho controlador presenta una notable estabilidad en la comunicación inalámbrica utilizando módulos de comunicación WI-FI o GSM, figura 3.2. Dicho microprocesador tiene un precio aproximado a los \$800.00 pesos mexicanos en su versión original.



Microcontrolador ATSM3X8E.  
Velocidad del reloj 84 MHz.  
Voltaje de Operación 3.3 Volts.  
Voltaje de entrada (jack DC) 7 – 12 Volts.  
Núcleo de 32 bits.  
54 Entradas/Salidas digitales.  
12 Entradas analógicas.  
12 Salidas tipo PWM.  
Corriente máxima en E/S 130 mA.  
2 Salidas analógicas (DAC).  
4 puertos UART.  
512 KB de Memoria flash para código.  
2 Puertos micro-USB

Figura 3.2: **Características del Arduino DUE.** Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la medición de la temperatura se seleccionó una sonda **DS18B20**, el cual además de su bajo costo, aproximadamente \$50.00 pesos mexicanos, se encuentra documentación relacionada con su uso en varios proyectos con Arduino, por lo que se cuenta con las librerías en el software de Arduino ya desarrolladas para un rápido manejo de las señales, figura 3.3.



Voltaje de alimentación 3 Volts a 5.5 Volts.  
Conexiones:  
VDD: Tensión de Alimentación  
GND: Tierra  
DQ: Datos  
Rango de temperaturas -55 °C a 125 °C  
Error (-10 °C a 85 °C) igual a +/- 0.5 °C  
Error (-55 °C a 125 °C) igual a +/- 2 °C  
Resolución: 9 bits, 10 bits, 11 bits o 12 bits.

Figura 3.3: **Sensor de Temperatura DS18B20.** Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

---

Para el caso del diseño y desarrollo del sensor de conductividad eléctrica (CE), se utilizó como sonda de medición un cable de alimentación eléctrica con su espiga, utilizando los dos conectores de la espiga como electrodos de medición, figura 3.4. Dicho elemento tiene un costo aproximadamente \$20.00 pesos mexicanos o se puede utilizar alguno que se tenga en casa sin utilidad.



Figura 3.4: **Sonda de medición de conductividad.** Fuente: Elaboración propia

Dicha sonda se conectó a una de las entradas analógicas del Arduino, realizando un divisor de voltaje con una resistencia de 1 K Ohm, permitiendo medir la variación de la resistencia eléctrica al ser introducida en un medio acuoso, y mediante la constante K de la celda de conductividad que viene dada por la relación existente entre la distancia de los electrodos  $d$  y su área  $A$ .

En el caso de la medición de pH se seleccionó una sonda del fabricante SEICTRON la cual tiene un costo en el mercado alrededor de los \$350.00 pesos mexicanos incluyendo el circuito de acondicionamiento de los datos el PH-4502C, figura 3.5.

## CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGÍA EXPERIMENTAL



Voltaje de entrada 5 Volts.  
 Voltaje de salida 0 a 4.2 Volts.  
 Corriente 5- 10 mA  
 Consumo 0.5 W  
 V+: Tensión de Alimentación  
 GND1 y GND2: Tierra  
 P0: Salida analógica que entrega una tensión proporcional al pH.  
 D0: Salida digital, el módulo PH-4502C  
 Conector de la Sonda: BNC  
 Led Verde: Alimentación  
 Led Rojo: Límite de pH configurado para la salida digital.

Figura 3.5: **Sonda de pH.** Fuente: Elaboración propia.

El circuito de acondicionamiento de la señal viene definido para medir en un intervalo de valores negativos y positivos. El 0 representa un pH de 7.0. Para poder utilizar con Arduino este circuito se añade un valor de offset al valor medido por la sonda, de esta forma el ADC solo tendrá que tomar muestras de valores positivos de tensión. Por lo tanto, forzamos un pH de 7.0 desconectando la sonda del circuito y cortocircuitando la parte interna del conector BNC con la exterior. Con un multímetro medimos el valor del pin Po y ajustamos el potenciómetro para que sea 2.5V.

La caracterización y calibración del sensor para la medición de pH se realiza mediante mediciones en el laboratorio utilizando muestras de buffer ya predefinidos. Se obtiene el pH de las muestras mediante un sensor patrón y registrando la respuesta de la sonda en análisis. Mediante la herramienta Excel se obtiene una ecuación que represente la característica de respuesta de dicho sensor para medir el pH.

En cuanto a la implementación del circuito de alimentación del equipo se utilizó el Panel Solar de 12V y 3W, con un costo aproximado de \$150.00 pesos mexicanos, para realizar la carga de tres baterías recargables tipo 18650 de 3.7 V conectadas en serie, las cuales con sus 2200 mAh serán capaces de proveer la corriente necesaria para el funcionamiento del Arduino DUE, del módulo de comunicación y de los sensores, en sitios remotos donde no exista conexión de energía eléctrica. El costo aproximado de estas baterías es de \$120.00 pesos mexicanos por unidad. Mediante la celda solar se recargarán las baterías con la energía solar apoyándonos con un módulo de carga y

## CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGÍA EXPERIMENTAL

protección BMS de carga regulada y balanceada para tres baterías con un costo aproximado de \$70.00 pesos mexicanos, lo que brindará una mayor autonomía del sistema, figura 3.6.



Figura 3.6: Panel Solar 12 V y 3W, batería tipo 18650 y módulo de carga BMS. Fuente: Elaboración propia.

El módulo de comunicación seleccionado para la comunicación Wi-Fi es el ESP8266 debido a su sencillez y su bajo costo aproximadamente de \$170.00 pesos mexicanos. Se trata de un chip integrado con conexión Wi-Fi y compatible con el protocolo TCP/IP. El objetivo principal es dar acceso a cualquier microcontrolador a una red. Una de sus principales ventajas es su bajo consumo. Dicho módulo se programa mediante comandos AT que no son más que comandos de texto enviados por Serial. Dicho dispositivo es compatible con los microprocesadores Arduino. Se muestran algunas de las principales características en la figura 3.7.



CPU Tensilica L106 32 bit  
 Voltaje de operación: 3 a 3.6 Volts.  
 Corriente de operación: 80 mA  
 Temperatura de operación: -40°C y 125 °C  
 Soporta IPv4  
 Buses comunicación: SPI, I2C y UART  
 Conexiones:



- |         |         |
|---------|---------|
| 1 GND   | 5 TXD   |
| 2 GPIO2 | 6 CH_PD |
| 3 GPIO0 | 7 RESET |
| 4 RXD   | 8 Vcc   |

Figura 3.7: Módulo WI-FI ESP8266. Fuente: Elaboración propia, basado en <https://programarfácil.com>.



## CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGÍA EXPERIMENTAL

---

---

### Herramientas recomendadas

Multímetro Digital.

Maleta de herramientas electrónica. (Cortador de cables, pelacables, soldador, limpiador de punta de soldadura).

Ordenador portátil (Laptop).

Cable microUSB-USB.

Pistola de calor.

Marco de segueta.

Juego de Alicates punta fina.

### Consumibles recomendados

Gabinete plástico para proyectos RADOX 17.5x13x6.4 cm.

Papel de lija fina.

Estaño.

Cinta helicoidal.

Pegamento caliente.

Cables.

### Métodos

En cuanto a los métodos utilizados se hace referencia fundamentalmente a:

- 1. Método teórico:** ya que se realizó el levantamiento de información sobre:
  - Funcionamiento de los sensores.
  - Funcionamiento de los módulos y controladores utilizados.
  - Funcionamiento de la plataforma de IoT.
  - Estudio bibliográfico sobre artículos vinculados con Índices de calidad del agua.
  - Estudio bibliográfico sobre artículos similares realizados.

## CAPÍTULO III. DISEÑO Y ESTRATEGÍA EXPERIMENTAL

---

---

- Método inductivo:** ya que se ordenó la información tratando de obtener conclusiones de carácter general desde acumulación de datos específicos, este método se aplicó por ejemplo para la definición de los parámetros a medir para determinar la calidad del agua.
- Método experimental:** fue aplicado en la realización de pruebas del funcionamiento para la calibración y la validación de los sensores utilizados.

# **CAPÍTULO IV. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

---

---

### 4.1. RESULTADOS

Los resultados derivados de este trabajo de investigación se mencionan en este capítulo.

#### **Temperatura:**

En primera instancia para el desarrollo del sensor de **temperatura** se utilizó una sonda de temperatura modelo DS18B20, se realizó la conexión con el microprocesador Arduino y mediante librerías ya desarrolladas en la biblioteca de Arduino, luego se llevó a cabo la lectura del valor de temperatura mediante una entrada digital del microprocesador. Se almacenaron 50 datos en un arreglo y posteriormente se ordenaron de menor a mayor con el fin de descartar los valores mínimo y máximo, para evitar lecturas erróneas y con los 48 valores restantes se realizó un promedio obteniendo un valor de temperatura con el menor error posible.

Posteriormente se realizaron pruebas en el laboratorio para su validación, efectuando mediciones con el sensor en cuestión y con un termómetro de vidrio de muy buena exactitud, el cual se utilizó como patrón para nuestras pruebas de calibración. Por último, con los datos obtenidos se procedió al análisis estadístico, para determinar el error de medición con el sensor implementado en el Arduino, con el fin de definir si cumple con las expectativas deseadas para dicho proyecto.

#### **Conductividad:**

Como segundo resultado podemos mencionar que se implementó un sensor de **conductividad eléctrica** utilizando como sonda de medición un cable de alimentación eléctrica utilizado en un equipo electrodoméstico común.

Varios autores recomiendan que para la alimentación de una sonda de medición de conductividad eléctrica en muestras acuosas se debe alimentar con corriente alterna o con un bajo voltaje significativamente por debajo del umbral de electrolisis para el agua (1.1V), esto para evitar polarizar la solución que se está probando y de esta forma evitar la contaminación de esta, además de minimizar los efectos de la corrosión en los electrodos utilizados en la sonda. Cualquiera de estas soluciones encarece nuestro proyecto notablemente. Por lo que se realiza una solución mucho más

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

---

---

sencilla y solo realizando las modificaciones mediante software. La sonda de medición es conectada a una de las salidas analógicas del Arduino, permitiendo realizar la alimentación de la sonda solo en el tiempo que se realiza la medición y desconectando la sonda al instante evitando con ello la polarización de esta.

La constante K de la celda de conductividad es la relación existente entre la distancia de los electrodos  $d$  y su área  $A$ . En este caso se calcula dicho valor obteniéndose una  $K=0.3$ , ver ecuación 1.6.

Mediante la programación en el Arduino se realiza la conversión de los valores de resistencias medidos a valores de conductividad utilizando la constante de celda K.

Posteriormente en el laboratorio se efectuaron las mediciones con dicho sensor en 10 muestras de agua y dichos valores fueron comparados con un sensor comercial (DOS-120W MICROPORCESADOR CONDUCTIVITY METER) utilizado como patrón. Analizando un intervalo de conductividad en el agua comprendido de 0 a 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  obteniéndose valores aceptables. A continuación, se realizó el ajuste de la medición teniendo en cuenta la temperatura de la muestra ya que en esta ocasión todas las muestras se realizan a temperatura ambiente de 25 °C, pero no siempre será el caso.

Para el ajuste se realizó, mediante programación, utilizando la medición de la temperatura obtenida con el sensor DS18B20 y la ecuación 3.8 y un coeficiente de temperatura de 0.019 valor citado por muchos autores como un valor adecuado para esta ecuación de ajuste.

Posteriormente se realizaron mediciones con ambos sensores a cuatro distintas muestras de agua a diferentes temperaturas, y mediante la comparación pareada se determinó estadísticamente que el sensor es adecuado para la aplicación en cuestión.

### **pH:**

Como siguiente resultado se puede citar el desarrollo de la medición de pH, como ya se mencionó con anterioridad se seleccionó una sonda de medición del fabricante SECTRION, la cual fue ajustada

---

---

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

para la utilización con Arduino en un rango de voltaje de 0 a 5 V. Dicha sonda presenta una muy buena relación de costo calidad y cubre todo el rango de pH.

Primero se realiza la caracterización de la sonda mediante la medición de 3 muestras buffer con el sensor patrón, en este caso el **Mi150 pH /Temperature Bench Meter** del fabricante Martin Instruments, el cual presenta una exactitud de  $\pm 0.01$  en la medición del pH y el sensor implementado en el Arduino.

Esta medición se realiza en 3 ocasiones en diferentes días obteniendo una linealidad muy similar entre los 3 puntos en las tres mediciones realizadas, los cuales se grafican utilizando la herramienta Excel y se obtiene la figura 4.1:

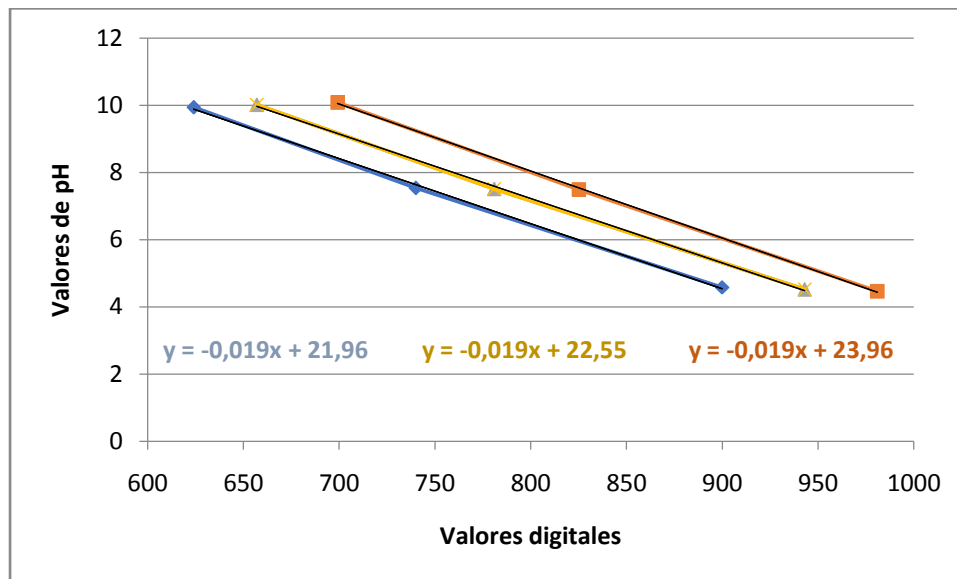


Figura 4.1: **Caracterización de la respuesta del sensor.** Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar la respuesta del sensor en el rango de medición (4 a 10 unidades de pH), es lineal con el mismo valor de pendiente negativa para los tres conjuntos de mediciones realizadas.

Por ello se decide utilizar la ecuación de la recta  $y = -0.019 * X + 22.55$ , la cual presenta el valor intermedio de los 3 conjuntos de mediciones realizadas, para una primera caracterización de la sonda e implementarla en el software del Arduino para la medición de los valores de pH en el rango en cuestión.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

---

---

Posteriormente se realiza la calibración de la sonda de medición de pH mediante mediciones en el laboratorio utilizando en este caso **la calibración en tres puntos**. Este tipo de calibración se aconseja cuando habitualmente se mide en toda la escala de pH o simplemente cuando se necesita mucha precisión. Esta calibración permitió realizar un ajuste fino en la programación del microcontrolador para obtener un valor más adecuado.

Como muestras de buffer se utilizaron las ya predefinidas:

Buffer1 pH=4.01

Buffer2 pH= 7.01

Buffer3 pH= 10.01

Una vez ya calibrado el sensor se decidió hacer algunos ajustes en la programación para lograr una mayor exactitud en la medición.

Se realizó la lectura de la entrada analógica del Arduino y se almacenaron 50 datos, los cuales posteriormente fueron ordenados en un arreglo de menor a mayor y se descartaron los valores mínimo y máximo, con el objetivo de eliminar datos erróneos. Con los 48 valores restantes se realizó un promedio y este valor obtenido fue ajustado mediante el software, programando la ecuación obtenida con anterioridad y de esta forma logrando la medición del pH de la muestra en cuestión.

Posteriormente se realizaron mediciones con ambos sensores en tres distintas muestras buffer y a diferentes temperaturas con el objetivo de analizar estadísticamente el error de medición que presenta nuestro sensor, llegando a la conclusión que es adecuado para nuestra aplicación.

### **Sistema de alimentación**

Otro de los resultados obtenidos fue la configuración y la implementación de un sistema para la carga de 3 baterías de Litio, tipo 18650 de 3.7 V, conectadas en serie para la alimentación eléctrica del equipo y las cuales son cargadas mediante una celda solar de 12 V y 3 W, utilizando un circuito de carga balanceada BMS para 3 baterías, ver figura 4.2,

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

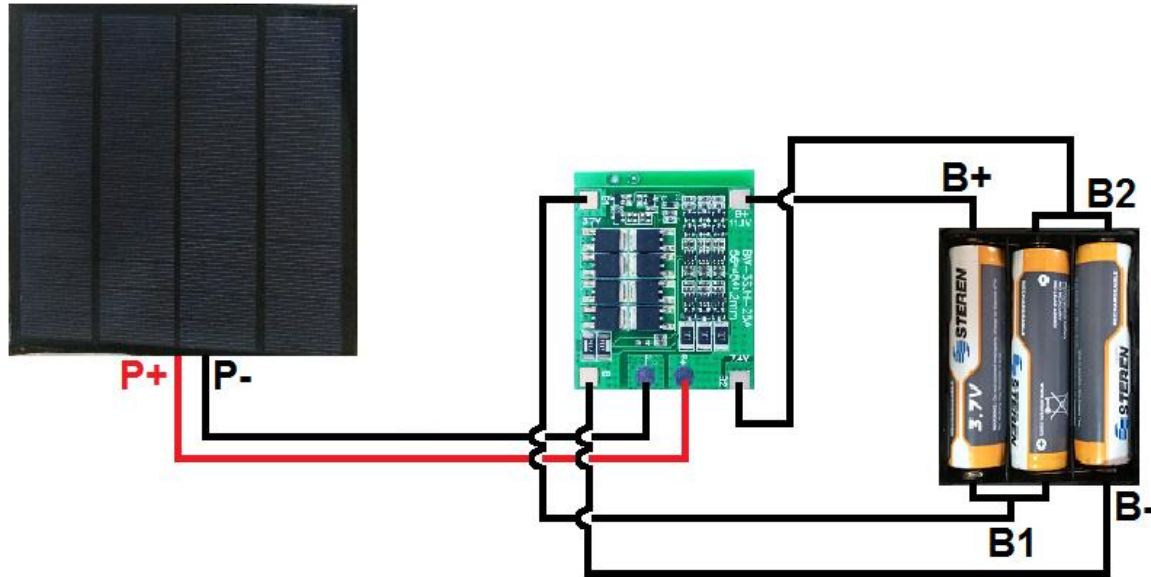


Figura 4.2: Implementación del sistema de alimentación eléctrica. Fuente: Elaboración propia.

También se desarrolló la programación del microcontrolador Arduino DUE, donde se realizó en primera instancia el acondicionamiento de las señales mediante software. En el caso de las mediciones de temperatura y pH se realizaron 50 mediciones y se ordenaron de menor a mayor para eliminar los extremos y evitar datos erróneos. Con los restantes 48 valores se determinó el promedio de la medición. En el caso del procesamiento de la variable de conductividad se midieron cada 15 segundos, debido que se alimenta la sonda solamente en el momento de realizar la medición para evitar la polarización de esta, dicha medición fue adecuada mediante las fórmulas correspondientes con la constante de la celda utilizada, y además se ajustó con el valor de la temperatura de la muestra.

Para el caso de la medición de los **Sólidos Disueltos Totales (TDS)** se obtuvo mediante la relación lineal aproximada existente entre estos valores en ppm y la conductividad de la muestra en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Conjuntamente mediante la programación se realizó toda la configuración del sistema, para la transmisión de los datos medidos utilizando un módulo de Wi-Fi ESP8266, el cual es configurado para la conexión del sistema a una red Wi-Fi local y para el envío de los datos medidos una plataforma de IoT en este caso ThingSpeak.



## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

---

---

Además, se realizó la configuración del sitio ThingSpeak donde se creó el canal de medición del modo privado y se configuró el sitio como **Calidad de Agua** y donde configuraron los cuatro campos de medición que se registran en dicha aplicación, dígase: conductividad eléctrica, TDS, temperatura y pH de las muestras de agua medida.

Posteriormente se realizan pruebas de comunicación utilizando un módulo de WI-FI ESP8266, con el cual se transmiten los datos de medición de conductividad, temperatura, pH, además de incluir una aproximación de los TDS mediante la medición de la conductividad eléctrica en el agua.

Se obtienen resultados satisfactorios en el envío de los datos con un periodo de muestreo aproximado de 45 segundos, el cual es aceptable para la aplicación en cuestión, ya que las variables analizadas no tienen una variación abrupta en el tiempo. Dichos resultados se muestran en la figura 4.3.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

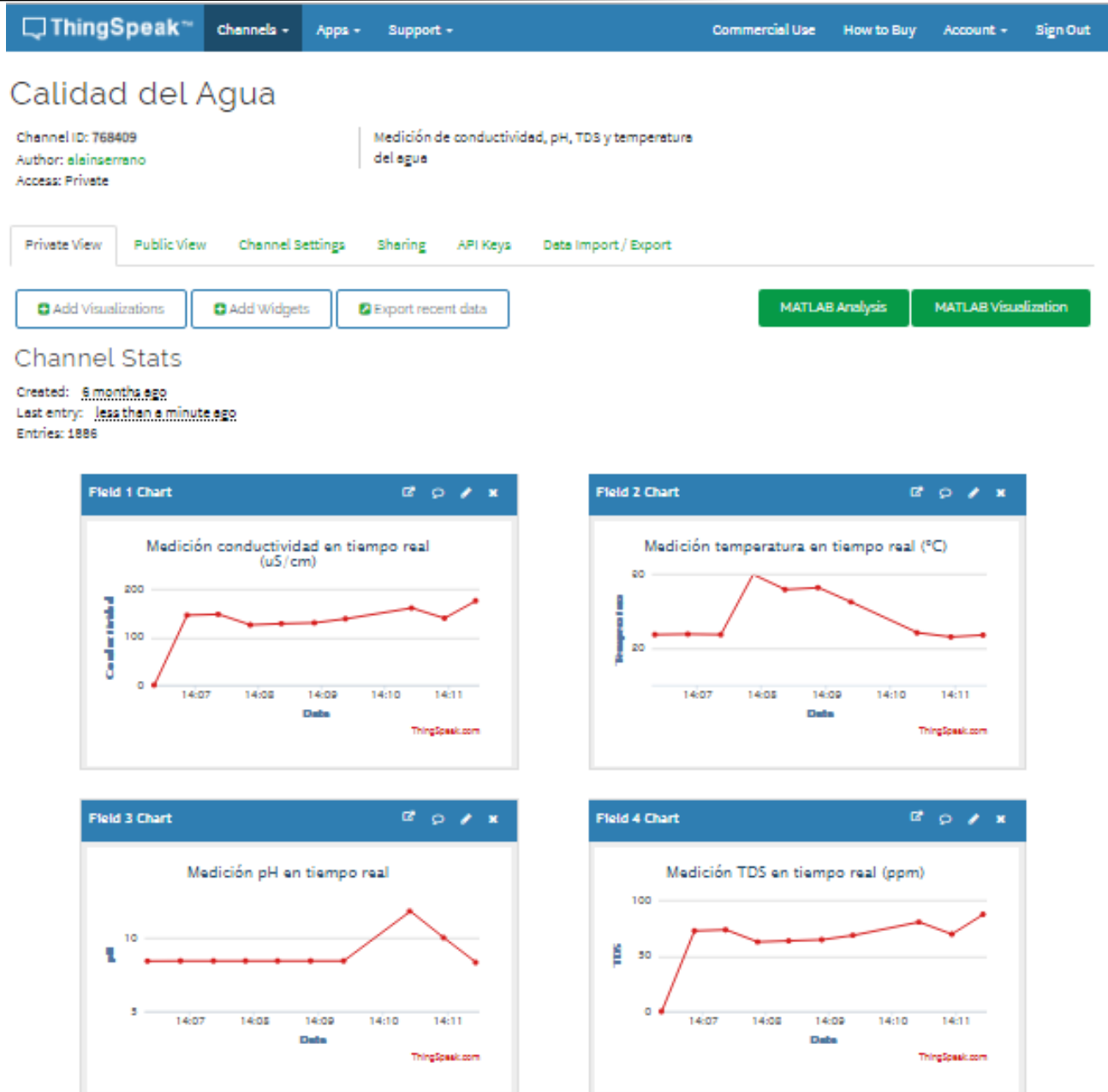
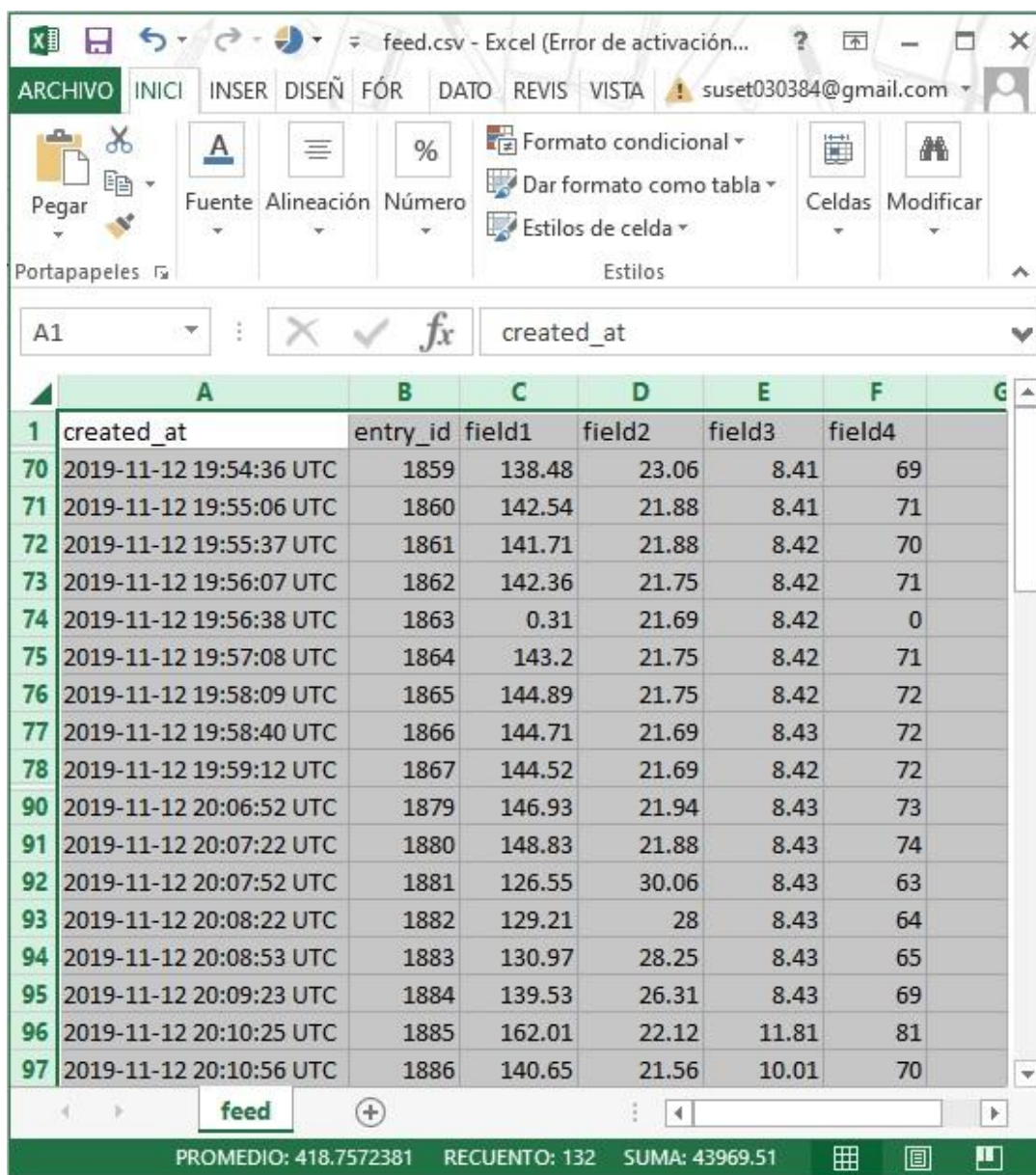


Figura 4.3: Valores registrados en THINGSPEAK. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en dicha plataforma se obtuvieron las mediciones en tiempo real de las variables consideradas en la determinación de la calidad del agua. Dichos valores son graficados para una mejor interacción con el usuario, pero también son almacenados en una base de datos en dicha aplicación con un almacenamiento máximo de 2000 datos por canal antes de que comiencen a reescribirse.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Estos valores almacenados en la base de datos fueron exportados a Excel para comprobar otra bondad que brinda el sistema, ya que los datos almacenados pueden ser exportados a Excel o a MatLab, ver figura 4.4. Con el fin de un posterior y más detallado análisis por parte de los usuarios interesados, como por ejemplo graficar varias variables juntas en un mismo plano, para con ello determinar la dependencia de una con otra, o para predecir sucesos futuros en cuanto a la contaminación del agua del sitio en cuestión, analizando la tendencia de los datos monitoreados.



	A	B	C	D	E	F	G
1	created_at	entry_id	field1	field2	field3	field4	
70	2019-11-12 19:54:36 UTC	1859	138.48	23.06	8.41	69	
71	2019-11-12 19:55:06 UTC	1860	142.54	21.88	8.41	71	
72	2019-11-12 19:55:37 UTC	1861	141.71	21.88	8.42	70	
73	2019-11-12 19:56:07 UTC	1862	142.36	21.75	8.42	71	
74	2019-11-12 19:56:38 UTC	1863	0.31	21.69	8.42	0	
75	2019-11-12 19:57:08 UTC	1864	143.2	21.75	8.42	71	
76	2019-11-12 19:58:09 UTC	1865	144.89	21.75	8.42	72	
77	2019-11-12 19:58:40 UTC	1866	144.71	21.69	8.43	72	
78	2019-11-12 19:59:12 UTC	1867	144.52	21.69	8.42	72	
90	2019-11-12 20:06:52 UTC	1879	146.93	21.94	8.43	73	
91	2019-11-12 20:07:22 UTC	1880	148.83	21.88	8.43	74	
92	2019-11-12 20:07:52 UTC	1881	126.55	30.06	8.43	63	
93	2019-11-12 20:08:22 UTC	1882	129.21	28	8.43	64	
94	2019-11-12 20:08:53 UTC	1883	130.97	28.25	8.43	65	
95	2019-11-12 20:09:23 UTC	1884	139.53	26.31	8.43	69	
96	2019-11-12 20:10:25 UTC	1885	162.01	22.12	11.81	81	
97	2019-11-12 20:10:56 UTC	1886	140.65	21.56	10.01	70	

PROMEDIO: 418.7572381 RECUENTO: 132 SUMA: 43969.51

Figura 4.4: Valores exportados a Excel. Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Finalmente se realizó el montaje del equipo utilizando una caja estanca RADOX de 17.5x13x6.4 cm. La cual, al cerrarse herméticamente, evita la entrada de polvo y agua cuando se utilice el equipo en lugares al aire libre. Se realizó toda la conexión interna del equipo y de los sensores, utilizando en estos últimos, silicón líquido para sellar los agujeros de la caja. Además, se realizó el montaje de un interruptor para el encendido del equipo permitiendo consigo que el sistema se pueda poner en funcionamiento desde el exterior. La conexión de la celda solar se realizó con un conector *plug and play* facilitando con ello, la utilización o no de la celda dependiendo de la aplicación donde se esté utilizando el equipo de medición, ver figura 4.5.

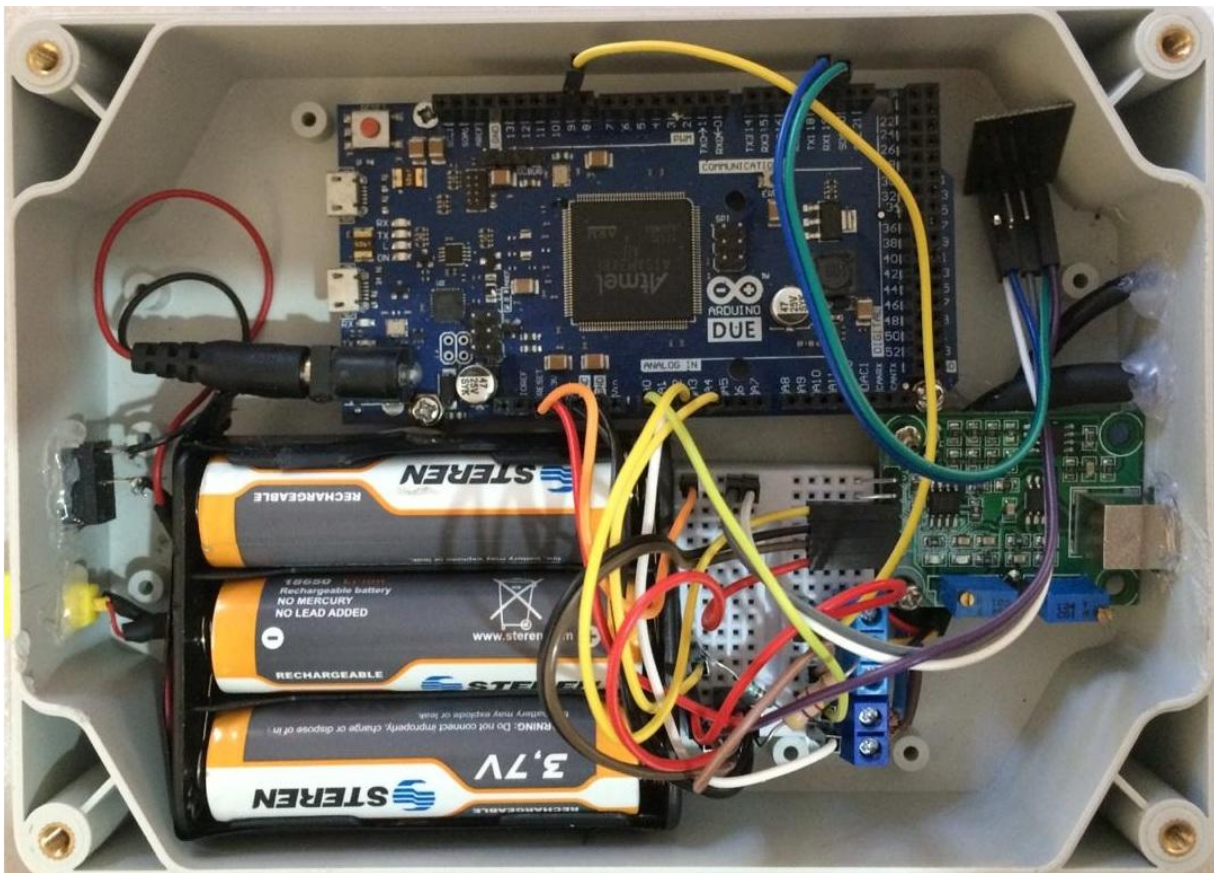


Figura 4.5: Conexión interno del gabinete del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.6 se muestra una vista exterior del equipo de medición desarrollado una vez concluido el montaje y conexión de todos los elementos explicados con anterioridad.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS



Figura 4.6: **Equipo de medición desarrollado.** Fuente: Elaboración propia.

---

---

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

---

---

### 4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En cuanto al análisis estadístico desarrollado, se realiza una comparación pareada de medias, de 30 muestras, obtenidas con el sensor desarrollado con el Arduino contra mediciones realizadas con un sensor profesional utilizado como patrón, para verificar que no existe una diferencia significativa entre las medias de ambos sensores.

Para ello se utiliza la prueba estadística de T-student, debido fundamentalmente a que esta prueba se realiza para verificar si las medias entre dos grupos de datos cuantitativos continuos son estadísticamente diferentes o no. Además de que los datos siguen una distribución normal y la varianza es desconocida (Flores-Ruiz E *et al.* 2017).

#### 4.2.1. Sensor de Temperatura

Para la calibración del sensor de temperatura se utilizó como patrón un termómetro de vidrio de intervalo de 0 a 100 °C con un margen de error de  $\pm 0.01$  °C, el cual presenta una mayor exactitud que otros sensores digitales convencionales.

Se realizaron la medición de 13 muestras de agua a diferentes temperaturas con ambos sensores y realizándolo dos veces en distintos días, lo que permitió analizar estadísticamente la respuesta de nuestro sensor, tabla 4.1.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Tabla 4.1: Mediciones en laboratorio para la validación del sensor de temperatura. Fuente: Elaboración propia.

Muestra de Agua.	Valor temperatura sensor patrón (°C)		Valor temperatura sensor Arduino (°C)		Diferencias Réplica 1	Diferencias Réplica 2
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2		
1	7.00	7.00	6.94	6.90	0.06	0.10
2	18.00	18.00	17.69	17.81	0.31	0.19
3	20.00	20.00	19.94	20.07	0.06	-0.07
4	21.00	21.00	21.25	21.18	-0.25	-0.18
5	22.00	22.00	21.56	21.62	0.44	0.38
6	24.00	24.00	24.42	24.29	-0.42	-0.29
7	27.00	27.00	27.25	27.33	-0.25	-0.33
8	32.00	32.00	31.69	31.81	0.31	0.19
9	35.00	35.00	35.06	34.87	-0.06	0.13
10	36.00	36.00	35.75	35.68	0.25	0.32
11	39.00	39.00	39.13	39.21	-0.13	-0.21
12	44.00	44.00	43.63	43.74	0.37	0.26
13	48.00	48.00	47.68	47.82	0.32	0.18

Se planteó la siguiente hipótesis ¿Se puede concluir que no hay una diferencia significativa entre las medias de los valores de temperatura obtenidas con el sensor desarrollado en Arduino y el sensor comercial utilizado como patrón?

### Resolución:

Hipótesis:

$$H_0: \mu_d = 0$$

$$H_1: \mu_d \neq 0$$

Estadístico de prueba:

$$t_0 = \frac{dm}{\frac{Sd}{\sqrt{n}}} \quad (4.1)$$

Donde:

dm: es el promedio de las diferencias.

Sd: es la varianza muestral

n: número de muestras

Calculando dm y Sd:

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

$$dm = \frac{\sum_{j=1}^n D_j}{n} = 0.06 \quad (4.2)$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - D_m)^2}{n-1}} = 0.26 \quad (4.3)$$

Sustituyendo los valores obtenemos que:  $t_0 = 1.29$

Analizando el rechazo se debe cumplir la siguiente condición:

$t_0 > t_{\alpha/2}$  y  $t_0 < -t_{\alpha/2}$ , los grados de libertad (L) y buscando en la tabla de T-student:

$$L = n - 1 = 25;$$

Ahora mediante el uso de Excel calculamos el P-valor donde obtenemos un  $\alpha = 0.21$

Entonces se puede decir que la condición de rechazo se va a cumplir para un nivel de significancia superior a 0.21 y por tanto en estos casos se rechazaría la hipótesis nula.

Por lo tanto, se puede concluir que con niveles de significancia menores a 0.21 se acepta la hipótesis nula. Por lo que se puede aseverar que con un nivel de significancia de 0.1 no existen diferencias significativas entre las medias de los valores de temperatura medidos con el sensor desarrollado en Arduino y el termómetro de vidrio utilizado como patrón.

Además, para corroborar esta conclusión se realizó el análisis de los datos mediante otro método de indicadores de desviación, el cual permite valorar la bondad de ajuste de los datos medidos con el sensor desarrollado y los datos medidos con el sensor patrón.

- El método de **desviación (% Error)** el cual permite conocer que tan lejos se encuentran las mediciones realizadas con el sensor desarrollado de las mediciones obtenidas con el sensor patrón.

$$Desviación(\% Error) = \frac{|X(\text{sensor desarrollado}) - X(\text{sensor patrón})|}{X(\text{sensor patrón})} * 100 \quad (4.4)$$

Realizando los cálculos se obtienen los valores que se muestran en la tabla 4.2:



## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Tabla 4.2: Mediciones en laboratorio para la validación del sensor de temperatura. Fuente: Elaboración propia.

Muestra de Agua.	Valor temperatura sensor patrón (°C)		Valor temperatura sensor Arduino (°C)		% Error Réplica 1	% Error Réplica 2
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2		
1	7	7	6.94	6.90	0.857	1.429
2	18	18	17.69	17.81	1.722	1.056
3	20	20	19.94	20.07	0.300	0.350
4	21	21	21.25	21.18	1.190	0.857
5	22	22	21.56	21.62	2.000	1.727
6	24	24	24.42	24.29	1.750	1.208
7	27	27	27.25	27.33	0.926	1.222
8	32	32	31.69	31.81	0.969	0.594
9	35	35	35.06	34.87	0.171	0.371
10	36	36	35.75	35.68	0.694	0.889
11	39	39	39.13	39.21	0.333	0.538
12	44	44	43.63	43.74	0.841	0.591
13	48	48	47.68	47.82	0.667	0.375

Donde se confirma la conclusión anterior y se puede detectar que el valor más alto de % de error es de 2 %, esto significa que nuestro sensor tiene una exactitud de un  $\pm 2\%$  como máximo en todo el rango de medición (10a 50°C).

Debido a que la aplicación donde se pretende usar el sensor, no necesita una excelente exactitud en la medición y que la implementación se desarrolla utilizando equipamiento de bajo costo. Se considera adecuado dicho sensor para la aplicación en cuestión.

### 4.2.2. Sensor de pH

Para la medición de pH se tomaron 3 muestras buffer a diferentes temperaturas para realizar la comparación pareada y determinar la validez o no del sensor implementado en el Arduino. Cabe mencionar que se realizó la comparación en tres bloques diferentes uno por cada muestra buffer utilizada, ver tabla 4.3. Las mediciones de pH se realizaron en un rango de temperatura entre 10 °C y 40 °C ya que es el rango de temperatura que nos interesa en las aplicaciones a utilizar dicho sensor.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Tabla 4.3: Mediciones en laboratorio para la validación del sensor de pH. Fuente: Elaboración propia.

T	Réplicas	Sensor desarrollado con Arduino			Sensor patrón Mi150		
		Muestra n°1	Muestra n°2	Muestra n°3	Muestra n°1	Muestra n°2	Muestra n°3
10°C	1	4.45	7.51	10.05	4.52	7.47	10.16
	2	4.60	7.56	9.97	4.58	7.50	10.10
15°C	1	4.43	7.44	10.03	4.50	7.48	10.15
	2	4.56	7.58	9.98	4.56	7.54	10.13
20°C	1	4.60	7.56	10.07	4.56	7.53	10.08
	2	4.57	7.55	9.96	4.58	7.57	10.06
25°C	1	4.57	7.61	10.04	4.58	7.58	10.09
	2	4.56	7.54	9.98	4.57	7.53	10.02
30°C	1	4.41	7.43	9.92	4.52	7.49	10.01
	2	4.53	7.52	9.95	4.49	7.56	9.98
35°C	1	4.47	7.55	9.97	4.49	7.50	10.03
	2	4.50	7.54	9.96	4.50	7.48	9.95
40°C	1	4.55	7.57	9.96	4.48	7.49	9.98
	2	4.51	7.53	9.94	4.52	7.46	9.93

Se planteó la siguiente hipótesis ¿Se puede concluir que no hay una diferencia significativa entre las medias de los valores de pH obtenidas con el sensor desarrollado y el sensor comercial utilizado como patrón?

### Resolución:

### Hipótesis:

$$H_0: \mu_d = 0$$

$$H_1: \mu_d \neq 0$$

En la tabla 4.4 se muestran los valores de la tabla 4.3 organizados por bloques.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Tabla 4.4: Mediciones en laboratorio para la validación del sensor agrupados por bloques. Fuente: Elaboración propia.

T	Réplicas	Muestra Buffer n°1		Muestra Buffer n°2		Muestra Buffer n°3	
		Sensor Arduino	Sensor Patrón	Sensor Arduino	Sensor Patrón	Sensor Arduino	Sensor Patrón
10°C	1	4.45	4.52	7.51	7.47	10.05	10.16
	2	4.60	4.58	7.56	7.50	9.97	10.10
15°C	1	4.43	4.50	7.44	7.48	10.03	10.15
	2	4.56	4.56	7.58	7.54	9.98	10.13
20°C	1	4.60	4.56	7.56	7.53	10.07	10.08
	2	4.57	4.58	7.55	7.57	9.96	10.06
25°C	1	4.57	4.58	7.61	7.58	10.04	10.09
	2	4.56	4.57	7.54	7.53	9.98	10.02
30°C	1	4.41	4.52	7.43	7.49	9.92	10.01
	2	4.53	4.49	7.52	7.56	9.95	9.98
35°C	1	4.47	4.49	7.55	7.50	9.97	10.03
	2	4.50	4.50	7.54	7.48	9.96	9.95
40°C	1	4.55	4.48	7.57	7.49	9.96	9.98
	2	4.51	4.52	7.53	7.46	9.94	9.93

En Excel calculamos las diferencias de los valores de pH entre el sensor construido y el sensor comercial utilizado como patrón para cada uno de los tres bloques:

Estadístico de prueba:

$$t_0 = \frac{dm}{\frac{Sd}{\sqrt{n}}} \quad (4.1)$$

Donde:

dm: es el promedio de las diferencias.

Sd: es la varianza muestral

n: número de muestras

$$dm = \frac{\sum_{j=1}^n D_j}{n} \quad (4.2)$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - D_m)^2}{n-1}} \quad (4.3)$$

Calculando **dm** y **Sd** y sustituyendo los valores se obtienen los valores de **t<sub>0</sub>** para cada uno de los bloques, además de calcular mediante Excel el P-valor (valor máximo de significancia que llevaría a aceptar la hipótesis nula) para cada uno, ver la tabla 4.5:

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Tabla 4.5: Valores obtenidos mediante el cálculo para cada bloque. Fuente: Elaboración propia.

Bloque	dm	Sd	$t_0$	P-valor
I	0.01	0.05	0.71	0.48
II	0.02	0.04	1.83	0.08
III	0.06	0.14	1.67	0.12

Analizando el rechazo se debe cumplir la siguiente condición:

$t_0 > t_{\alpha/2}$  y  $t_0 < -t_{\alpha/2}$ ; los grados de libertad (L) y buscando en la tabla de T-student:

$$°L = n - 1 = 13;$$

Por lo tanto, se puede concluir que con un nivel de significancia de 0.05 se acepta la hipótesis nula, no existen diferencias significativas entre las medias de los valores de pH medidos con el sensor desarrollado con el Arduino y el sensor comercial utilizado como patrón de referencia, para cada uno de los tres bloques estudiados.

Además, para corroborar esta conclusión se realizó el análisis de los datos mediante otro método de indicadores de desviación, el cual permitió valorar la bondad de ajuste de los datos medidos con el sensor desarrollado y los datos medidos con el sensor patrón.

- El método de **desviación (% Error)** el cual permite conocer que tan lejos se encuentran las mediciones realizadas con el sensor desarrollado de las mediciones obtenidas con el sensor patrón.

$$Desviación(\% Error) = \frac{|X(\text{sensor desarrollado}) - X(\text{sensor patrón})|}{X(\text{sensor patrón})} * 100 \quad (4.4)$$

Realizando los cálculos se obtienen los valores de % de desviación que se muestran en la tabla 4.6:

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Tabla 4.6: Valores de % de desviación obtenidos. Fuente: Elaboración propia.

T	Réplicas	Bloque I			Bloque II			Bloque III		
		Sensor Arduino	Sensor Patrón	% Error	Sensor Arduino	Sensor Patrón	% Error	Sensor Arduino	Sensor Patrón	% Error
10°C	1	4.45	4.52	<b>1.54</b>	7.51	7.47	<b>0.53</b>	10.05	10.16	<b>1.08</b>
	2	4.60	4.58	<b>0.43</b>	7.56	7.50	<b>0.80</b>	9.97	10.10	<b>1.28</b>
15°C	1	4.43	4.50	<b>1.55</b>	7.44	7.48	<b>0.53</b>	10.03	10.15	<b>1.18</b>
	2	4.56	4.56	<b>0.00</b>	7.58	7.54	<b>0.53</b>	9.98	10.13	<b>1.48</b>
20°C	1	4.60	4.56	<b>0.87</b>	7.56	7.53	<b>0.39</b>	10.07	10.08	<b>0.09</b>
	2	4.57	4.58	<b>0.21</b>	7.55	7.57	<b>0.26</b>	9.96	10.06	<b>0.99</b>
25°C	1	4.57	4.58	<b>0.21</b>	7.61	7.58	<b>0.39</b>	10.04	10.09	<b>0.49</b>
	2	4.56	4.57	<b>0.21</b>	7.54	7.53	<b>0.13</b>	9.98	10.02	<b>0.39</b>
30°C	1	4.41	4.52	<b>2.43</b>	7.43	7.49	<b>0.80</b>	9.92	10.01	<b>0.89</b>
	2	4.53	4.49	<b>0.89</b>	7.52	7.56	<b>0.52</b>	9.95	9.98	<b>0.30</b>
35°C	1	4.47	4.49	<b>0.44</b>	7.55	7.50	<b>0.66</b>	9.97	10.03	<b>0.59</b>
	2	4.50	4.50	<b>0.00</b>	7.54	7.48	<b>0.80</b>	9.96	9.95	<b>0.10</b>
40°C	1	4.55	4.48	<b>1.56</b>	7.57	7.49	<b>1.06</b>	9.96	9.98	<b>0.20</b>
	2	4.51	4.52	<b>0.22</b>	7.53	7.46	<b>0.93</b>	9.94	9.93	<b>0.10</b>

Donde se confirmó la conclusión anterior y se pudo detectar que los valores de % de Error de todas las medidas son inferiores al 2.5%. Lo que significa que nuestro sensor tiene una exactitud de un  $\pm 2.5\%$  como máximo en el intervalo de medición evaluado (4 a 10 unidades de pH). Por lo que se consideró que el sensor desarrollado es adecuado para la medición de pH con una exactitud aceptable en los rangos y aplicaciones deseados.

### 4.2.3. Sensor de conductividad

En cuanto a la medición de conductividad se toman cuatro muestras de aguas mezcladas con una disolución de Cloruro de Potasio (KCl) a diferentes temperaturas para realizar la comparación pareada y determinar la validez o no del sensor implementado en el Arduino. En la tabla 4.7 se muestran los valores obtenidos:

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Tabla 4.7: Mediciones en laboratorio para la validación del sensor en unidades de  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Fuente: Elaboración propia.

T	Réplicas	Sensor desarrollado con Arduino				Sensor DOS-120W Microprocesador Conductivity Meter			
		Muestras							
		n°1	n°2	n°3	n°4	n°1	n°2	n°3	n°4
15°C	1	760	150	793	1247	750	157	798	1238
	2	757	148	788	1251	746	144	795	1236
20°C	1	758	138	799	1255	747	141	807	1245
	2	766	151	790	1267	747	145	801	1249
25°C	1	758	142	810	1231	753	148	806	1242
	2	761	151	794	1241	752	153	800	1247
30°C	1	743	147	797	1237	754	144	801	1239
	2	763	145	794	1245	750	152	803	1241
35°C	1	757	143	799	1230	761	149	792	1235
	2	762	141	794	1244	765	147	796	1240

Se planteó la siguiente hipótesis ¿Se puede concluir que no hay una diferencia significativa entre las medias de los valores de conductividad obtenidos con el sensor desarrollado con el Arduino y el sensor comercial utilizado como patrón?

### Resolución:

### Hipótesis:

$$H_0: \mu_d = 0$$

$$H_1: \mu_d \neq 0$$

En la tabla 4.8 se muestran los mismos valores medidos en el laboratorio, pero organizados por bloques.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Tabla 4.8: Valores obtenidos en laboratorio para la validación del sensor agrupados por bloques en unidades de  $\mu\text{S/cm}$ . Fuente: Elaboración propia.

T	Réplicas	Muestra n°1		Muestra n°2		Muestra n°3		Muestra n°4	
		Sensor Arduino	Sensor Patrón	Sensor Arduino	Sensor Patrón	Sensor Arduino	Sensor Patrón	Sensor Arduino	Sensor Patrón
15°C	1	760	750	150	157	793	798	1247	1238
	2	757	746	148	144	788	795	1251	1236
20°C	1	758	747	138	141	799	807	1255	1245
	2	766	747	151	145	790	801	1267	1249
25°C	1	758	753	142	148	810	806	1231	1242
	2	761	752	151	153	794	800	1241	1247
30°C	1	743	754	147	144	797	801	1237	1239
	2	763	750	145	152	794	803	1245	1241
35°C	1	757	761	143	149	799	792	1230	1235
	2	762	765	141	147	794	796	1244	1240

En Excel se calculan las diferencias de los valores de conductividad entre el sensor construido y el sensor comercial utilizado como patrón para cada uno de los cuatro bloques:

Estadístico de prueba:

$$t_0 = \frac{dm}{\frac{Sd}{\sqrt{n}}} \quad (4.1)$$

Donde:

dm: es el promedio de las diferencias.

Sd: es la varianza muestral

n: número de muestras

$$dm = \frac{\sum_{j=1}^n D_j}{n} \quad (4.2)$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - D_m)^2}{n-1}} \quad (4.3)$$

Calculando **dm** y **Sd** y sustituyendo los valores se obtienen los valores de **t<sub>0</sub>** para cada uno de los bloques. Además de calcular el valor de P-valor para cada uno de los bloques, ya sea mediante Excel o calculándolo utilizando una interpolación lineal entre los valores de la tabla de T-studen con  $\alpha = 0.05$  y donde se cumple la condición  $t_0 > t_{\alpha/2}$  y donde no se cumple dicha condición. Es decir, calcular la

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

ecuación de la recta con esos dos puntos y después evaluar el valor de  $t_0$  para obtener el valor de P-valor.

En la tabla 4.9 se muestran los valores obtenidos para cada uno de los bloques

Tabla 4.9: **Valores obtenidos mediante el cálculo para cada bloque.** Fuente: Elaboración propia.

Bloque	dm	Sd	$t_0$	P-valor
I	6.0	9.21	2.06	0.07
II	2.4	7.09	1.07	0.31
III	4.1	8.92	1.45	0.18
IV	3.6	9.62	1.18	0.27

Analizando el rechazo se debe cumplir la siguiente condición:

$t_0 > t_{\alpha/2}$  y  $t_0 < -t_{\alpha/2}$ ; los grados de libertad (L) y buscando en la tabla de T-student:

$$°L = n - 1 = 9;$$

Por lo tanto, se puede concluir que con un nivel de significancia de 0.05 se acepta la hipótesis nula, por lo que se puede decir que no existen diferencias significativas entre las medias de los valores de conductividad medidos con el sensor desarrollado con el Arduino y el sensor comercial utilizado como patrón, para cada uno de las cuatro muestras estudiadas.

Además, para corroborar esta conclusión se realizó el análisis de los datos mediante otro método de indicadores de desviación, el cual permite valorar la bondad de ajuste de los datos medidos con el sensor desarrollado y los datos medidos con el sensor patrón.

- El método de **desviación (% Error)** el cual permite conocer que tan lejos se encuentran las mediciones realizadas con el sensor desarrollado de las mediciones obtenidas con el sensor patrón.

$$Desviación(\% Error) = \frac{|X(\text{sensor desarrollado}) - X(\text{sensor patrón})|}{X(\text{sensor patrón})} * 100 \quad (4.4)$$

Realizando los cálculos se obtienen los valores de % desviación que se muestran en la tabla 4.10:



## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Tabla 4.10: Valores de % de desviación obtenidos. Fuente: Elaboración propia.

T	Réplicas	Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV
		% Error	% Error	% Error	% Error
15°C	1	1.33	4.45	0.62	0.72
	2	1.47	2.77	0.88	1.21
20°C	1	1.47	2.12	0.99	0.80
	2	2.54	4.13	1.37	1.44
25°C	1	0.66	4.05	0.49	0.88
	2	1.19	1.30	0.75	0.48
30°C	1	1.45	2.08	0.49	0.16
	2	1.73	4.60	1.12	0.32
35°C	1	0.52	4.02	0.88	0.40
	2	0.39	4.08	0.25	0.32

Donde se confirmó la conclusión anterior y se puede detectar que todos los valores de % desviación son inferiores al 4.6%, esto significa que nuestro sensor tiene una exactitud de un  $\pm 4.6\%$  como máximo en el rango de medición evaluado ( $100\mu\text{S}/\text{cm}$  a  $1200\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Por lo que se verificó que el sensor desarrollado es adecuado para la medición de la conductividad con una exactitud aceptable en el rango de medición estudiado y para la aplicación en cuestión.

# CAPÍTULO V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

### 5.1. DISCUSIÓN

#### 5.1.1. Análisis de los resultados estadísticos obtenidos en la validación de los sensores.

En cuanto a la validación estadística de los sensores analizados se puede concluir que son adecuados para la aplicación del proyecto.

Analizando la medición de temperatura con el sensor desarrollado en Arduino y analizando las mediciones realizadas en todo el rango de aplicación, se observó que el equipo presenta un valor de incertidumbre absoluta de medición de  $\pm 0.3$  °C, redondeándolo a un lugar después del punto decimal, ya que es la resolución calculada para el equipo. Un valor aceptable si lo comparamos con la exactitud de medición de los sensores comerciales similares que rondan entre  $\pm 0.15$ °C y  $\pm 0.5$ °C en el intervalo de medida estudiado (Hanna\_Instruments, 2019).

Respecto al análisis de las mediciones de pH en cada una de las 3 muestras buffer analizadas se realizaron 14 mediciones con el sensor de pH desarrollado a diferentes temperaturas, se calculó el promedio y la incertidumbre absoluta de la medición (tabla 5.1):

Tabla 5.1: **Resumen de valores de incertidumbre obtenidos en la validación del sensor de pH.** Fuente: Elaboración propia.

Muestras	# Mediciones	Promedio	Incertidumbre absoluta
Muestra Buffer #1	14	4.52	$\pm 0.062$
Muestra Buffer #2	14	7.54	$\pm 0.049$
Muestra Buffer #3	14	9.98	$\pm 0.045$

Lo que se pudo observar que el valor mayor de incertidumbre absoluta de la medición se obtiene en la muestra buffer #1 el cual es de 0.062 unidades de pH. Por lo que se puede definir un valor de incertidumbre absoluta máximo de  $\pm 0.1$  unidades de pH, definiendo un solo lugar después del punto decimal, ya que es la resolución calculada para el sensor desarrollado o una incertidumbre relativa porcentual máxima de  $\pm 1.3\%$  para el rango de medición estudiado. Un valor aceptable si lo comparamos con las incertidumbres de medición de los sensores comerciales (Hanna\_Instruments, 2019).

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

En la figura 5.1 se muestran las mediciones realizadas con ambos sensores para las distintas muestras analizadas, presentando una representación gráfica de la comparación realizada.

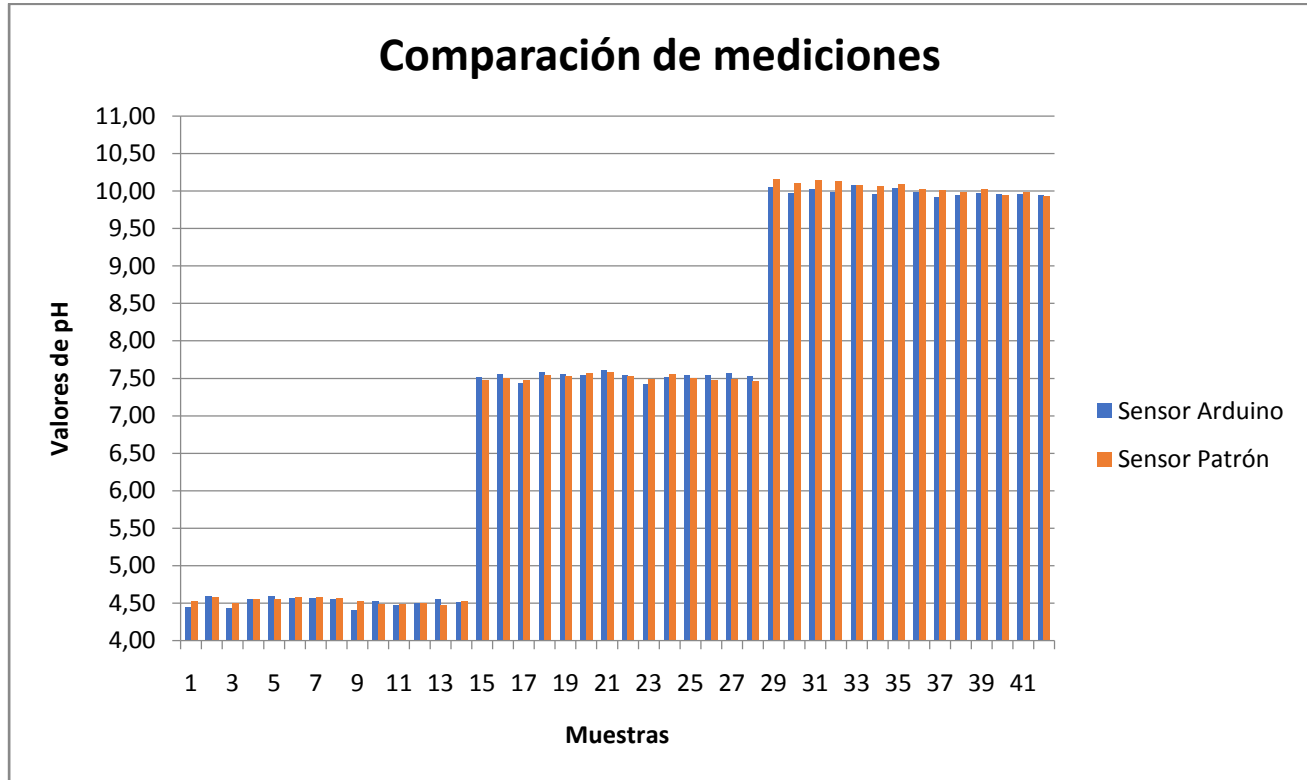


Figura 5.1: Gráfico representativo de los datos medidos con ambos sensores de pH. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la validación estadística del sensor de conductividad desarrollado se realizó el análisis de cada una de las 4 muestras analizadas por separadas, donde en cada una de ellas se realizaron 10 mediciones con el sensor de conductividad desarrollado a diferentes temperaturas, se calcula el promedio y la incertidumbre absoluta de la medición (tabla 5.2).

Tabla 5.2: Resumen de valores de incertidumbre obtenidos en la validación del sensor de conductividad. Fuente: Elaboración propia.

Muestras	# Mediciones	Promedio	Incertidumbre absoluta
Muestra #1	10	758.5 $\mu\text{S/cm}$	$\pm 6.2 \mu\text{S/cm}$
Muestra #2	10	145.6 $\mu\text{S/cm}$	$\pm 4.5 \mu\text{S/cm}$
Muestra #3	10	795.6 $\mu\text{S/cm}$	$\pm 6.1 \mu\text{S/cm}$
Muestra #4	10	1244.8 $\mu\text{S/cm}$	$\pm 11.2 \mu\text{S/cm}$

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

En este caso el valor de incertidumbre varía en dependencia de la medición basado fundamentalmente en el intervalo de medición analizado. Pero se puede definir un valor de incertidumbre relativa porcentual máximo de  $\pm 3.0\%$  para el rango analizado, definiendo un solo lugar después del punto decimal, ya que es la resolución calculada para el sensor desarrollado. Un valor aceptable si lo comparamos con las incertidumbres de medición de los sensores comerciales similares que están alrededor del  $\pm 2\%$  a máxima escala (Hanna\_Instruments, 2019).

Desde el punto de vista que el equipo desarrollado es de bajo costo y que brindaría una información básica de la calidad del agua en tiempo real, no se necesita sensores muy exactos, ya que sobre todo se utilizaría para analizar tendencias o cambios significativos que alerten de posibles contaminaciones. Para poder determinar con exactitud la calidad del agua del sitio en cuestión y del tipo de contaminación que está presentando se necesitarían realizar otras mediciones y de otros parámetros en el laboratorio.

En la figura 5.2 se muestran las mediciones realizadas con ambos sensores para las distintas muestras analizadas, presentando una representación gráfica de la comparación realizada.

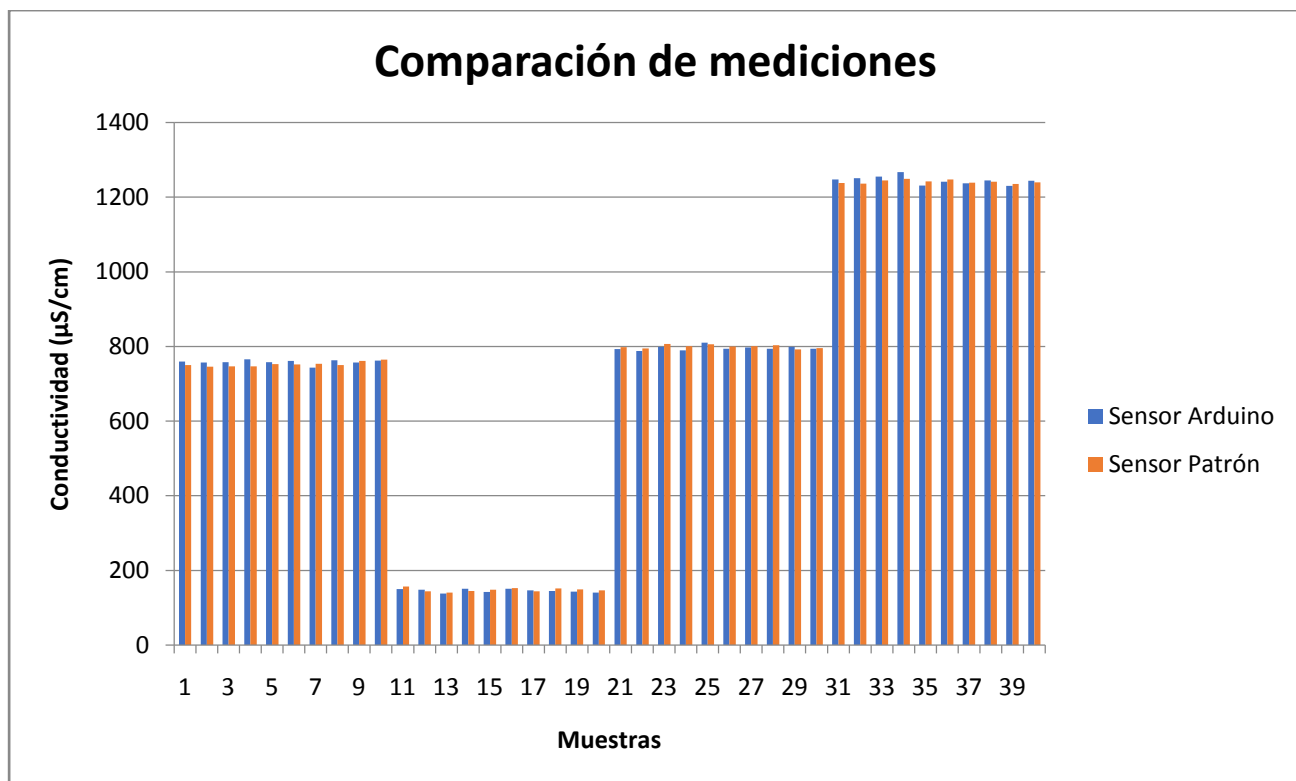


Figura 5.2: Gráfico representativo de los datos medidos con ambos sensores de Conductividad. Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

### 5.1.2. Análisis económico del costo del equipo desarrollado.

Una de las premisas del estudio desarrollado es la disminución de costos y lograr un equipo accesible para la mayoría de las personas, y de esta forma permitir una generalización del monitoreo de la calidad del agua con todos los beneficios que esto conlleva.

A continuación, se hace un desglose de los costos de los insumos utilizados para el desarrollo de los equipos desarrollados (tabla 5.3)

Tabla 5.3: Costo de los equipos utilizados en el proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Precio (MXN)	Precio (Dólares)
<b>Microprocesador Arduino DUE</b>	771.00	42.85
<b>Sonda medición de Temperatura DS18B20</b>	44.00	2.45
<b>Sonda medición de pH</b>	340.00	18.90
<b>Sonda medición de Conductividad</b>	18.00	1.00
<b>Modulo comunicación WI-FI ESP8266</b>	171.00	9.50
<b>Panel Solar 12v 3W Celda Fotovoltaica</b>	155.00	8.60
<b>Circuito BMS de Carga de baterías</b>	74.00	4.10
<b>Baterías de Litio 3.7 V 3500 mA (3u originales)</b>	420.00	23.30
<b>Gabinete RADOX y otros insumos de montaje</b>	250.00	13.90
<b>Total</b>	<b>\$2,243.00</b>	<b>\$124.60</b>

Haciendo una comparación, con equipos similares desarrollados hasta la fecha, se puede concluir que se ha logrado el objetivo debido a lo que mostramos a continuación:

El proyecto desarrollado con software y hardware libre por un grupo de trabajo de la Universidad de Melbourne, Australia, relacionado con el tema calidad del agua, encabezado por (Rao *et al.* 2013), logran la medición de 6 parámetros determinantes en la calidad del agua, pero el costo del prototipo se eleva hasta los €1040.00, aproximadamente \$1,200.00 dólares. Vale aclarar que el proyecto abarca más variables y que es un poco más ambicioso.

En el año 2016 en la Universidad Politécnica de Madrid, España, se realiza un proyecto vinculado con el monitoreo de la calidad del agua potable con hardware y software libres (El-Kouri, 2016). El autor realiza un análisis de tres proyectos básicos en estos temas y selecciona uno de ellos para

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

---

---

modificarlo y ajustarlo a sus necesidades, realizando un análisis económico del costo del prototipo, Según el autor se logra el desarrollo del equipo con un costo €130.00, aproximadamente \$150.00 dólares. En este caso se logra alcanzar un costo razonable para la solución que implementaron, lo que el proyecto no incluye la transmisión de los datos en tiempo real, solamente miden las variables y almacenan los datos en una memoria SD.

Otro de los proyectos que referencia un valor del costo del desarrollo del equipo, es el proyecto desarrollado en la Universidad Autónoma de México en el año 2017. En donde un grupo multidisciplinario desarrollan un equipo de medición mediante el cual se miden 5 parámetros básicos para determinar la calidad del agua potable, vale aclarar que en este proyecto se incluye el análisis de la presencia de bacterias patógenas lo que hace que se encarezca un poco más el proyecto (Semanao\_UAM, 2017). El costo del prototipo fue de \$8,000.00 pesos mexicanos, alrededor de \$450.00 dólares, y aunque se confirma que es posible la disminución del costo realizando algunas recomendaciones, no se ha encontrado evidencia de que se haya logrado la reducción de dicho costo.

El resto de los proyectos estudiados como antecedentes de este trabajo dígame (RIFLE, 2015), (Mãe\_d'água, 2015), (González-Ruiz, 2016), entre otros, si bien presentan entre sus premisas la obtención de equipamiento de bajo costo, no presentan un análisis económico del equipo desarrollado, por lo que no se pueden desarrollar comparaciones directas en cuanto a este importante tema.

Por lo que, analizando la hipótesis planteada en nuestro trabajo, se demuestra que es posible desarrollar un equipo de medición confiable para medir los parámetros básicos de calidad del agua en tiempo real, utilizando software y hardware libres y a un costo asequible, ya que el costo final del prototipo de equipo desarrollado fue de \$2,243.00 pesos mexicanos aproximadamente \$125.00 dólares.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

---

---

### 5.2. CONCLUSIONES

Mediante las pruebas de laboratorio se verificaron los sensores de conductividad, pH y temperatura desarrollados, contra sensores comerciales utilizados como patrones, concluyendo mediante un análisis estadístico de comparación pareada de los datos obtenidos, que los tres sensores son adecuados para la monitorización en tiempo real de la calidad del agua.

Con el diseño y la implementación del circuito de alimentación del equipo utilizando el panel solar para cargar las baterías de este, se logró mayor autonomía de la solución, logrando un mayor tiempo de funcionamiento del equipo en lugares remotos donde no existe alimentación eléctrica.

Mediante las pruebas de comunicación se verificó todo el canal de medición, desde la toma de las variables mediante los sensores, pasando por el procesamiento de los datos realizado en el microcontrolador Arduino, la configuración y él envió de los datos mediante WI-FI hacia una plataforma de IoT (ThingSpeak), donde se grafican y registran los valores medidos en tiempo real.

Concluyendo que es posible el desarrollo de un equipo de medición de las principales variables determinantes en la calidad de una fuente de agua (dígase; conductividad, pH y temperatura), mediante equipamiento de bajo costo y con la utilización de software y hardware libres, obteniéndose resultados confiables con un valor máximo de incertidumbre relativa porcentual del  $\pm 3\%$ .



## PERSPECTIVAS

---

---

### PERSPECTIVAS

Aunque se cumplen con los objetivos planteados en la investigación y se obtiene el equipo de medición a bajo costo para el monitoreo en tiempo real de parámetros como: temperatura, conductividad eléctrica y pH en el agua, utilizando tecnologías de software y hardware libres. Existen algunos aspectos que se consideran importantes a destacar como recomendaciones futuras en estos temas de investigación.

Dentro de las perspectivas que deja este trabajo, es necesario plantear que el diseño del equipo se realizó dejando entradas digitales y analógicas disponibles, lo que permitiría en un futuro, seguir incrementando sensores para la medición de otros parámetros de calidad del agua, dígase: oxígeno disuelto, turbidez entre otros. Por lo que se considera esto una posibilidad para futuros trabajos.

En cuanto al circuito de alimentación eléctrica del equipo, este se debería llevar a cabo con una celda solar de mayor capacidad o implementar otro sistema para la carga de las baterías, ya que, aunque el sistema funciona correctamente, la carga de las baterías es bastante lenta y esto podría traer problemas en días nublados y en aplicaciones donde se necesite el equipo en funcionamiento por largos períodos de tiempo, por lo que se requiere perfeccionar esta parte.

Otro de los aspectos que vale la pena destacar es que, se recomienda en trabajos futuros realizar el desarrollo de la comunicación inalámbrica utilizando un módulo de comunicación GSM/GPRS, ya que esto le brindaría una mayor prestancia al equipo, pudiéndose utilizar en lugares remotos donde no se tenga ninguna conexión Wi-Fi, pero si exista cobertura de comunicación de algún proveedor de servicios de telefonía. Claro esto teniendo en cuenta el costo del módulo y de las tarifas de paquetes de datos, para que no se encarezca en demasía el equipo.

También es importante destacar que, aunque el servidor de acceso libre ThingSpeak funciona perfectamente y da acceso a los datos medidos tanto para su visualización como para la exportación de los mismos a Excel o a MatLab. Si se desea lograr un mayor control y una confidencialidad sobre los datos medidos en una aplicación específica, se recomienda que se desarrolle un servidor propio para el registro de los datos.

## REFERENCIAS

---

---

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alméciga-Gómez M. A y Muñoz-Martínez M. (2013). pH. Historia de un concepto. Análisis de textos de Educación Superior. Maestría en Docencia de la Química. Departamento de Química, Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad. Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia.

Álvarez. J. P. A, Cutillas. P. P, Valle. O. R& Cabañero. J. J. A. (2016). Degradación de los recursos hídricos en un ambiente semiárido. Las lagunas de Bustillos y de los mexicanos (Chihuahua. México). Papeles de Geografía. 62: 107-118.

Álvarez. A, Rubiños-Panta J. E, Gavi-Reyes. F, Alarcón-Cabañero. J. J, Hernández-Acosta E, Ramírez-Ayala. C, Mejía-Saenz. E, Pedrero-Salcedo. F, Nicolás-Nicolás. E. y Salazar-Sosa. E. (2006). Índice de calidad del agua en la cuenca del río Amajac. Hidalgo. México: Diagnóstico y Predicción. Revista Internacional de Botánica Experimental. 75: 71-83.

Arduino-Introducción. (2018). [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc) (en inglés). (Consultado el 22 de noviembre de 2018).

Banna H M., Najjaran H., Sadiq R., Imran A. S., Rodríguez J. M. y Hoofar M. (2014). Miniaturized water quality monitoring PH and conductivity sensors. Escuela de Ingeniería. Universidad de British Columbia. Kelowna. BC. Canadá. ELSEVIER. Sensors and actuators B: Chemical.

Bórquez-López R. A, Martínez-Córdova L. R, Casillas-Hernández R, López-Elías J. A, Barraza-Guardado R. H, Ibarra-Gómez J. C y Gil-Núñez J. C. (2017). Monitoreo del índice de calidad del agua para camaronicultura por medio de un hardware de acceso abierto y un sistema de inferencia difusa. Universidad de Sonora, México. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud (BIOTECNIA).XIX (3): 45-49.

Boyacioglu H. (2007). Development of a water quality index based on a European classification scheme. Water SA. Vol. 33. No. 1. Enero. 2007. pp. 101-106.

Catálogo del Fabricante, Hanna Instruments. (2019).Manual de Instrucciones. HI 9811 & HI 9811-5 Medidores Portátiles de pH/CE/TDS/°C.

Catálogo del Fabricante, Hanna Instruments. (2019).Manual de Instrucciones. HI HI 9829 Medidor multiparamétrico, con GPS, sonda de registro y medición de turbidez e ISE opcional. Consultado en: <https://hannainst.com.mx/productos/linea/acuacultura/medidor-multiparametrico-a-prueba-de-agua-para-phiseceodturbidez-con-gps-opcional/>

Çengel A. Y y Boles A. M. (2009). *Temodinámica, 6ta edición*. Mc Graw Hill Company.

## REFERENCIAS

---

Cloete. N. A., Malekian. R. y Nair L. (2016). Design of Smart Sensor for Real-Time Water Quality Monitoring. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Electrónica e Informática de la Universidad de Petroria. Sudáfrica. IEEEExplore.

Elamparithi P., Esther. A. S. y Gowri. J. A. (2018). Water Quality Monitoring System using IoT. Departamento de Ciencias de la Computación e Ingeniería. Facultad de Ingeniería y Tecnología AAA. Sivakasi. IEEEExplore.

El-Khoury. N. V. (2016). Adaptación e implementación de un sistema autónomo de bajo coste de monitorización de calidad del agua en tiempo real. Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Madrid.

Flores-Ruiz E, Miranda-Novales MG, Villasís-Keever MÁ. El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial. Rev Alerg Mex. 2017; 64(3):364-370

GitHub (2008). Plataforma de desarrollo colaborativo en internet. Disponible en <https://github.com/>

Gralla P. (2007). Cómo funcionan las redes inalámbricas. 1<sup>ra</sup> Edición. Editorial Anaya.

Gómez F. I. y Gómez A. J. Sistema de Adquisición de datos de bajo costo basado en hardware y software libre y abierto. (2011). Centro de investigación. Grupo de Investigación en Ingeniería Aplicada. Universidad Salazar y Herrera. Quid. N°. 17. pp. 23-28. Jun-Dic.2011. ISSN: 1692-343X. Medellín-Colombia.

González-Ruiz I. (2016). Monitorización de la calidad de aguas pluviales vertidas a cauce público en entornos industriales mediante tecnología Low-Cost. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad de Sevilla.

Hanna Instruments (2004), Manual del fabricante. Sitio Web del Fabricante. Disponible en <https://www.hannainst.es/blog/234/cual-es-la-relacion-existente-entre-la-conduc>

Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. (2018). Publicación de las Naciones Unidas emitida por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DESA). eISBN: 978-92-1-363319-9 Editora: Lois Jensen.

Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (WWDR) (2019). No dejar a nadie atrás. Publicado en 2019 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 7, place de Fonteno y, 75352 París 07 SP, Francia.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA. (2014). Estrategia para potabilización de agua en las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, Morelos, con un enfoque holístico. Ciudad de México: IMTA-SEMARNAT.

Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Mazatlán (JUMAPAM). (2016). Distribución de Agua en el Planeta. Disponible en <https://www.jumapam.gob.mx/cultura-del-agua/distribucion-de-agua-en-el-planeta> (Consultado 11-09-2018).

---

## REFERENCIAS

---

---

Lambrou. P.T. y Panayiotou G. C. (2013). A Low-Cost System for Real Time Monitoring and Assessment of Potable Water Quality at Consumer Sites. IEEE.

Lambrou. P.T., Anastasiou C. C. y Panayiotou G. C. y Polycarpou M. M. (2014). A Low-Cost Sensor Network for Real-Time Monitoring and Contamination detection in drinking water distribution systems. IEEE.

Mãe\_d'\_água. Rede Amazonia Project (2015). Disponible en: <https://publiclab.org/wiki/mae-d-agua>.

Martín-Galvín R. (2020). Físicoquímica y Microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas. Segunda Edición. Ediciones Díaz de Santos. (Libro Electrónico)

Matovelle. D. L. (2015). Diseño de un sensor de conductividad de bajo costo para medidas de conductividad en muestras acuosas. Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Sangolquí. Ecuador.

Monroy González. M. F., Virgüez Muñoz. J., Martínez Simbaqueba. J., Santamaria Botero. N., Pardo Prieto. C., Prieto Saenz. A., Junco Smith. E., Munevar. D., & Corredor Leon. B. (2019). Medición in situ de cualidades del agua para diseño de dispositivo. *Letras Con\*Ciencia Tecno\*Lógica*. (17). 31-40.

Murphy K., Heavy B., Sullivan T., Zhang D., Paludetti L., Lau K. T., Diamond D., Costa E., O'Connor N. y Regan F. (2017). A low-cost autonomous optical sensor for water quality monitoring. ELSEVIER.

NMX-AA-093-SCI-2000. (2000) Norma Mexicana. Análisis de Agua. Determinación de la conductividad Electrolítica. Método de Prueba. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.

NMX-AA-008-SCI-2016. (2016). Norma Mexicana. Análisis de Agua. Medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de Prueba. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.

NMX-AA-007-SCI-2013. (2013). Norma Mexicana. Análisis de Agua. Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de Prueba. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.

Organización Mundial de la Salud (2019). Agua. Datos y Cifras. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.

Organización Mundial de la Salud (2006). Guías para la calidad del agua potable. 3ra edición. Ginebra:

Olguín. E. J, González-Portear. E, Sánchez-Galván. G. Zamora-Castro. J. E. y Owen. T. (2010) Contaminación de ríos urbanos: El caso de la subcuenca del río Sordo en Xalapa. Veracruz. México. *Rev Latinoam BiotecnolAmb Algal*. 1(2): 178-190.

## REFERENCIAS

---

Pérez-Garrido C, León-Rodríguez M. F y Delgadillo García R. G. (2013). Tratamientos de Aguas. Manual de Laboratorio. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. México.

Pérez Laguarda A. (2017) Control y supervisión mediante un sistema microcontrolador de los parámetros de calidad de agua de un estanque. Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación. Departamento de Ingeniería Electrónica. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.

Pizarro-Peláez J. (2019). Internet de las cosas IoT con Arduino. Manual Práctico. Ediciones Paraninfo S.A. 1<sup>ra</sup> Edición, Santiago de Compostela, España.

Ramakrishnaiah CR, Sadashivalah C, Ranganna G (2009) Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka state. *Indian Journal\_chemistry* 6: 523-530.

Rao. S. A, Marshall S, Gubbi J, Palenishwami M, Sinnott R y Pettigrove V. (2013). Design of Low-cost Autonomous Water Quality Monitoring System. Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Melbourne IEEEExplore.

Ravazzani. G. (2017). Open hardware portable dual-probe heat-pulse sensor for measuring soil thermal properties and water content. *Computers and Electronics in Agriculture*. 133. 9–14.

RIFFLE. Public's Lab Open Water Project. (2015) Disponible en: [https://publicab.org/wiki/riffle\\_design\\_philosophy](https://publicab.org/wiki/riffle_design_philosophy)(Consultado 20-09-2018).

Robles E. S, Ramírez E, Durán A, Martínez M. E, González M. E. (2013). Calidad bacteriológica y fisicoquímica del agua del acuífero Tepalcingo-Axochiapan, Morelos, México. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 4, núm. 1, enero-marzo, 2013, pp. 19-28 Executive Business School La Serena, Chile

Roman-Herrera C., Loza Motovelle D., Segura L. y Dabiriam R. (2016). Construcción con Tecnología abierta de un sensor de turbidez de bajo costo. ITECKNE.

Rubio H. O. Ortiz. R. C. Quintana R. M. Saucedo R. A. Ochoa J. M y Rey N. I (2014). Índice de calidad del agua (ICA) en la presa La Boquilla en Chihuahua. México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 1(2):139-150.2014.

Santillán Tovar G. y Campos Delgado D.U. (2016) Prácticas de Laboratorio con Arduino DUE. Facultad de Ciencias. UASLP.

Semanario\_UAM\_No\_45\_17\_Jul\_2017. (2017). Crea la UAM tecnología de uso fácil y costo bajo para medir la calidad del agua potable. Universidad Autónoma México. Disponible en: [http://www.uam.mx/semanario/xxiii\\_45/files/assets/common/downloads/Semanario\\_UAM\\_No\\_45\\_17\\_Jul\\_2017.pdf](http://www.uam.mx/semanario/xxiii_45/files/assets/common/downloads/Semanario_UAM_No_45_17_Jul_2017.pdf)

## REFERENCIAS

---

SEMARNAT, Compendio de Estadísticas Ambientales. (2012) Dirección General de Estadística e Información Ambiental, 2011, con base en: Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, Octubre 2005. Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del Agua en México, 1a edición, CNA, México, 2011.

Torres. P, Cruz. C. H, Patiño. P, Escobar. J. C. y Pérez. A. (2010) Aplicación de índices de calidad de agua – ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano. *Ingeniería e Investigación*. 30(3): 86-95.

UNEP -United Nations Environment Programme. (2007). Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis Report. Ontario. Canada.[www.gemswater.org](http://www.gemswater.org)

UNEP/WHO: Water Quality Monitoring. (1996). - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater. Quality Studies and Monitoring Programmes

Webster G. J y Eren H. (2014). Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. Spatial, Mechanical, Thermal and Radiation Measurement. Second Edition. Boca Raton, Florida, EEUU.

Zhuykov S. y Kats C. (2012). Integrated Solid-state Sensors Monitoring Water Quality for the Next Generation of Wireless Sensor Networks.

## ANEXOS

---

---

### ANEXO-1. Programación desarrollada en el Arduino.

```
#define SSID "XXXXXXXX" // Nombre de la Red Wi-Fi a la que nos conectamos
#define PASS "XXXXXXXX" // Contraseña de la Red Wi-Fi
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
String apiKey = "HTCUM5QKEZP46Q88";
const int pinDatosDQ = 9;
OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);
const int sensorPH = A2;
int sensorValue = 0;
float avgValue;
float b;
float buf[50],temp;
float avgValue1;
float b1;
int buf1[50],temp1;
int R1= 1000;
int Ra=25;
int ECPin= A0;
int ECGround=A1;
int ECPower =A4;
float PPMconversion=0.5;
float TemperatureCoef = 0.019;
float K=0.3;
float Temperature;
float EC=0;
float EC25 =0;
int ppm =0;
float raw= 0;
float Vin= 5;
float Vdrop= 0;
float Rc= 0;
float buffer=0;

void setup()
{
  sensorDS18B20.begin();
  Serial.begin(115200);
  Serial1.begin(115200);
  Serial.println("Conexión establecida PC -> Arduino Puerto Serie Default");
```

## ANEXOS

---

```

Serial1.println("AT\r\n");
delay(1000);
  Respuesta_Wi-Fi();
  Serial.println();
  conexion_Wi-Fi();      //Conectarse a la red
  Serial.println("Configuración obtenida..");
  Serial1.println("AT+CIFSR");
delay(10000);
  Respuesta_Wi-Fi();
  pinMode(ECPin,INPUT);
  pinMode(ECPower,OUTPUT);
  pinMode(ECGround,OUTPUT);
  digitalWrite(ECGround,LOW);
delay(200);
R1=(R1+Ra);
}

void loop()      // Código que estará constantemente ejecutándose
{
  sensorDS18B20.requestTemperatures();
  float Temperatura = sensorDS18B20.getTempCByIndex(0);//lectura de la temperatura
  for(int i=0;i<50;i++)
  {
    buf[i]=Temperatura;
delay(30);
  }
  for(int i=0;i<49;i++)
  {
    for(int j=i+1;j<50;j++)
    {
      if(buf[i]>buf[j])
      {
        temp=buf[i];
        buf[i]=buf[j];
        buf[j]=temp;
      }
    }
  }
  avgValue=0.0;
  for(int i=2;i<50;i++) avgValue+=buf[i];
  float TemperaturaOK=(float)avgValue/48;
  for(int k=0;k<50;k++) //lectura del pH
  {

```

---



## ANEXOS

---

```

buf1[k]=analogRead(sensorPH );
delay(30);
}
for(int k=0;k<49;k++)
{
  for(int l=k+1;l<50;l++)
  {
    if(buf1[k]>buf1[l])
    {
      temp1=buf1[k];
      buf1[k]=buf1[l];
      buf1[l]=temp1;
    }
  }
}
avgValue1=0.0;
for(int k=2;k<50;k++)
avgValue1+=buf1[k];
float pHVol=(float)avgValue1/48;
float pHvalor = -0.019 * pHVol + 22.65;
GetEC();
delay(10000);
thingSpeakWrite(EC25, TemperaturaOK, pHvalor, ppm);
delay(16000);
Respuesta_Wi-Fi();
}
boolean conexion_Wi-Fi()
{
  Serial1.println("AT+CWMODE=3");
  delay(2000);
  Respuesta_Wi-Fi();
  String comando="AT+CWJAP=\"";
comando += SSID;
comando += "\",\"";
comando += PASS;
comando += "\"";
  Serial1.println(comando);
  delay(10000);
  Respuesta_Wi-Fi();
}
void Respuesta_Wi-Fi()
{
  while(Serial1.available())

```

---

## ANEXOS

---

```
Serial.write(Serial1.read());
}
void Envio_a_Wi-Fi()
{
    while(Serial.available())
        Serial1.write(Serial.read());
}
boolean thingSpeakWrite(float value1, float value2, float value3, float value4){
    String cmd = "AT+CIPSTART=\"TCP\", \"";
    cmd += "184.106.153.149";           // api.thingspeak.com
    cmd += "\",80";
    Serial1.println(cmd);
    Serial.println(cmd);
    if(Serial1.find("Error"))
    {
        Serial.println("AT+CIPSTART error");
        return false;
    }
    String getStr = "GET /update?api_key=";
    getStr += apiKey;
    getStr += "&field1=";
    getStr += String(value1);
    getStr += "&field2=";
    getStr += String(value2);
    getStr += "&field3=";
    getStr += String(value3);
    getStr += "&field4=";
    getStr += String(value4);
    getStr += "\r\n\r\n";
    cmd = "AT+CIPSEND=";
    cmd += String(getStr.length());
    Serial1.println(cmd);
    Serial.println(cmd);
    delay(100);
    if(Serial1.find(">"))
    {
        Serial1.print(getStr);
        Serial.print(getStr);
    }
    else{
        Serial1.println("AT+CIPCLOSE");
        Serial.println("AT+CIPCLOSE");
        return false;
    }
}
```

---

## ANEXOS

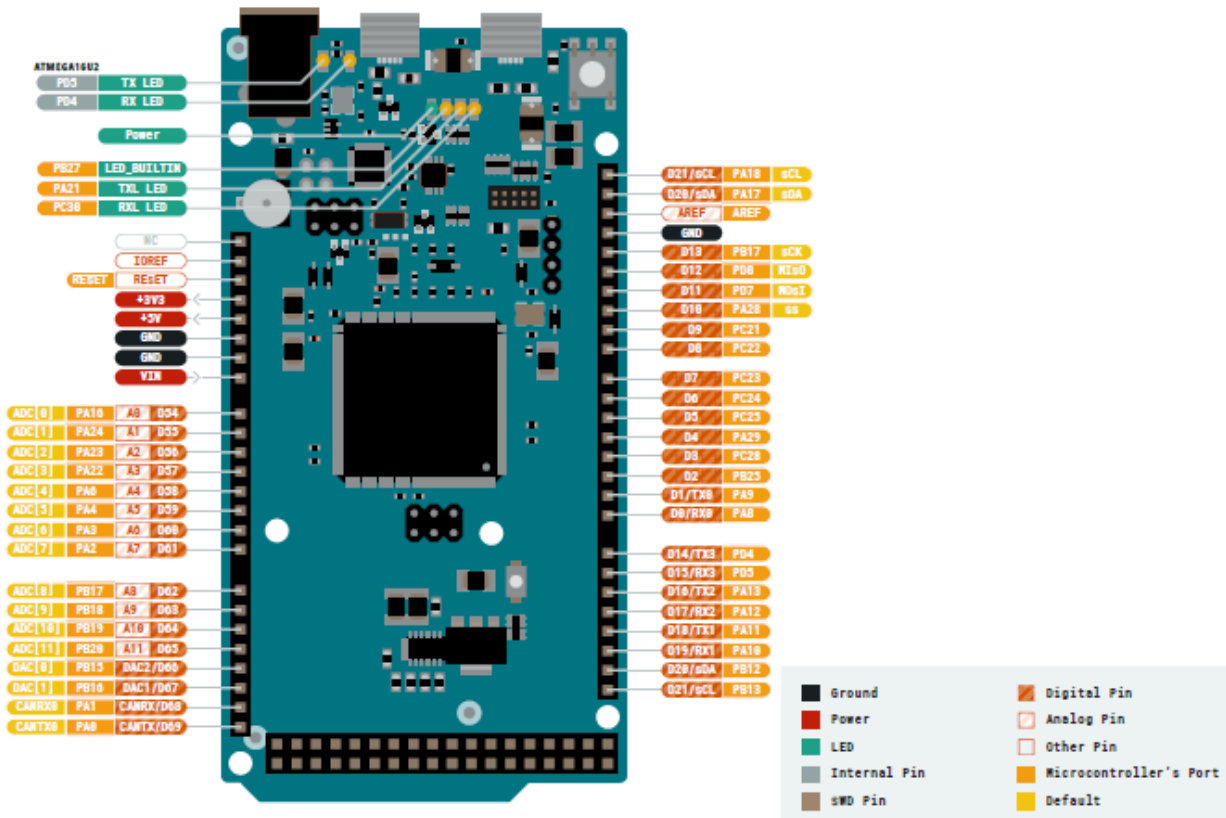
---

---

```
}  
    return true;  
}  
void GetEC()  
{  
    sensorDS18B20.requestTemperatures();  
    Temperature = sensorDS18B20.getTempCByIndex(0);  
    digitalWrite(ECPower,HIGH);  
    raw= analogRead(ECPin);  
    raw= analogRead(ECPin);  
    digitalWrite(ECPower,LOW);  
    Vdrop= (Vin*raw)/1024.0;  
    Rc=(Vdrop*R1)/(Vin-Vdrop);  
    Rc=Rc-Ra;  
    EC = (1000000*K)/Rc;  
    EC25 = EC/ (1+ TemperatureCoef*(Temperature-25.0));  
    //ppm=(EC25)*(PPMconversion*1000);  
    ppm=(EC25)*PPMconversion;  
};
```

## ANEXOS

### ANEXO-2. Pinout y características del Arduino DUE.



Microcontroller	AT91SAM3X8E
Operating Voltage	3.3V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-16V
Digital I/O Pins	54 (of which 12 provide PWM output)
Analog Input Pins	12
Analog Output Pins	2 (DAC)
Total DC Output Current on all I/O lines	130 mA
DC Current for 3.3V Pin	800 mA
DC Current for 5V Pin	800 mA
Flash Memory	512 KB all available for the user applications
SRAM	96 KB (two banks: 64KB and 32KB)
Clock Speed	84 MHz
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	36 g