

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y
AUTOMÁTICA

TRABAJO FIN DE GRADO

ANALIZADOR DE AGUA CONECTADO A IOT

Alumno/Alumna: ARANA, OBRA, JAVIER

Director/Directora (1): SAINZ DE MURIETA, MANGADO, JOSEBA

Curso: 2019-2020

Fecha: Lunes, 10, 02, 2020



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
RESUMEN	7
LABURPENA	8
ABSTRACT	9
1 - MEMORIA	10
1.1 - INTRODUCCIÓN	10
1.1.1 - OBJETIVOS Y ALCANCE	11
1.1.2 - JUSTIFICACIÓN	12
1.2 - CONTEXTO.....	13
1.2.1 - PARÁMETROS ANALIZADOS	14
1.2.2 - REPÚBLICA DE EL SALVADOR	16
1.3 - ANTECEDENTES	25
1.3.1 - ESTADO DEL ARTE.....	25
2 - MARCO TEÓRICO	27
2.1 - DESCRIPCIÓN GENERAL	27
2.2 - ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS MULTIVARIABLES.....	28
2.3 - PARTE 1: TERMÓMETRO	28
2.4 - PARTE 2: PH-METRO	31
2.5 - PARTE 3: TURBIDÍMETRO	33
2.6 - PARTE 4: MICROCONTROLADOR	38
2.7 - PARTE 5: COMUNICACIONES	42
3 - DISEÑO E IMPLMENTACIÓN.....	46
3.1 - TERMÓMETRO	46
3.2 - PH-METRO.....	52
3.3 - TURBIDÍMETRO	59
3.4 - MICROCONTROLADOR.....	68
3.5 - COMUNICACIONES	73
4 - ANÁLISIS DE RESULTADOS	80

4.1 - PRUEBA 1: SENSOR TEMPERATURA	80
4.2 - PRUEBA 2: SENSOR PH.....	80
4.3 - PRUEBA 2: SENSOR TURBIDEZ	82
5 - METODOLOGÍA	84
6 - PRESUPUESTO.....	87
7 - CONCLUSIONES Y LINEAS DE DESARROLLO FUTURAS.....	89
8 - BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Distribución de los diferentes departamentos de la República de El Salvador. [8]	18
Figura 1.2 Pirámide demográfica de la República de El Salvador en el año 2000 [9]..	20
Figura 1.3 Pirámide demográfica de la República de El Salvador en 2018 [9]	20
Figura 1.4 Pirámide demográfica de España en 2018 [9].....	21
Figura 1.5 Gráfico sobre el índice de desarrollo humano de El Salvador y España [10]	22
Figura 1.6 Gráfico del número de precipitaciones (mm) por meses. [11].....	23
Figura 1.7 Calidad de agua en pozos del AMSS y alrededores. [12]	24
Figura 1.8 Esquema general del tratamiento mediante biojardineras. [15]	26
Figura 2.1 Croquis del Analizador de agua conectado a IoT	27
Figura 2.2 Croquis explicativo de los ángulos que condicionarán las mediciones.	35
Figura 2.3 PIC24 con la Explorer 16.....	39
Figura 2.4 Arduino UNO.....	40
Figura 2.5 Arduino Mega	41
Figura 2.6 ESP8266 ESP01 [22]	43
Figura 2.7 Ethernet Shield W5100	43
Figura 2.8 SIM 800L [23].....	44
Figura 3.1 Curva de calibración PT100. [24]	46
Figura 3.2 Circuito termómetro realizado en Multisim.....	47
Figura 3.3 Índices absolutos máximos. [25].....	48
Figura 3.4 Configuración de la ganancia mediante la resistencia RG. [25]	48
Figura 3.5 Diagrama de flujo. Termómetro.....	50
Figura 3.6 Código sensor temperatura. Parte 1 de 3.....	51
Figura 3.7 Código sensor temperatura. Parte 2 de 3.....	51
Figura 3.8 Código sensor temperatura. Parte 3 de 3.....	52
Figura 3.9 Características del pH-metro a 25°C. [26]	52
Figura 3.10 Variación del pH a diferentes temperaturas. [27]	53
Figura 3.11 Curva de calibración del sensor de pH.....	53
Figura 3.12 Diagrama de flujo. pH-metro.	55
Figura 3.13 Código sensor pH, función de calibración. Parte 1 de 3.	55
Figura 3.14 Código sensor de pH. Declaración de variables. Parte 2 de 5.....	56
Figura 3.15 Código sensor de pH. Estabilización. Parte 3 de 5.	56
Figura 3.16 Código sensor de pH. Estabilización. Parte 4 de 5.	57
Figura 3.17 Almacenamiento y visualización de datos en display.....	57
Figura 3.18 Código sensor de pH. Estabilización. Parte 5 de 5.	58
Figura 3.19 Visualización del valor de pH.	58
Figura 3.20 Métodos de medición nefelométricas.	59
Figura 3.21 Método Enfrentados.	59
Figura 3.22 Espectro de las partículas en suspensión. [28].....	60

Figura 3.23 Diagrama de bloque del OPT101. [29]	61
Figura 3.24 Configuración de los pins y funciones del OPT101. [29].....	61
Figura 3.25 Circuito acondicionador del OPT101	61
Figura 3.26 Circuito acondicionador para el emisor infrarrojo SFH4554.....	62
Figura 3.27 Código medición de turbidez, método enfrentados. Parte 1 de 3.....	63
Figura 3.28 Pantalla recepción de datos en directo.	64
Figura 3.29 Código medición de turbidez, método enfrentados. Parte 2 de 3.....	65
Figura 3.30 Disoluciones para las mediciones de turbidez.	66
Figura 3.31 Turbidímetro HACH 2100N.	66
Figura 3.32 Código medición de turbidez, método enfrentados. Parte 3 de 3.....	67
Figura 3.33 Pantalla final de la medición de turbidez.	67
Figura 3.34 Conexiones display Adafruit. [30]	68
Figura 3.35 Comunicación SPI con múltiples esclavos. [31].....	68
Figura 3.36 Esquema de conexiones display LCD. [32]	69
Figura 3.37 Circuito pulsadores de navegación. [33].....	69
Figura 3.38 Código menús. Parte 1 de 3.	70
Figura 3.39 Código menús. Parte 2 de 3.	71
Figura 3.40 Código menús. Parte 3 de 3.	72
Figura 3.41 Declaración de constantes Arduino Mega.....	72
Figura 3.42 Comunicaciones turbidímetro. Parte 1 de 5.	74
Figura 3.43 Comunicaciones turbidímetro. Parte 2 de 5.	74
Figura 3.44 Forzar refresco de datos en Thinger.io.....	75
Figura 3.45 Configuración base de datos Thinger.io.	75
Figura 3.46 Comunicaciones turbidímetro. Parte 3 de 5.	76
Figura 3.47 Comunicaciones turbidímetro. Parte 4 de 5.	76
Figura 3.48 Comunicaciones turbidímetro. Parte 5 de 5.	77
Figura 3.49 Credenciales Thinger.io.	78
Figura 3.50 Menú de dispositivos, Thinger.io.....	78
Figura 3.51 Pantalla monitores Thinger.io.	79
Figura 4.1 Prueba 1. Sensor Temperatura.	80
Figura 4.2 Prueba 2: PH meter GLP22.....	81
Figura 4.3 Patrones turbidez 1.....	82
Figura 4.4 Patrones turbidez 2.....	82
Figura 4.5 Datos turbidez en la plataforma Thinger.io.....	83
Figura 5.1 Diagrama de Gantt.	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Normas deseables para aguas crudas superficiales que solamente requieren sistemas convencionales de tratamiento. [1]	13
Tabla 1.2 Exportaciones e importaciones de la República de El Salvador	19
Tabla 1.3 Índices de desarrollo de España y El Salvador [10]	21
Tabla 2.1. Análisis de alternativas termómetro	31
Tabla 2.2 Análisis de alternativas sensor pH.....	33
Tabla 2.3 Análisis de alternativas de Turbidímetros	38
Tabla 2.4 Análisis de alternativas de Microcontroladores	41
Tabla 2.5 Análisis de alternativas de módulos de comunicación	45
Tabla 4.1 Variación del pH en los patrones respecto a la temperatura.	81
Tabla 6.1 Presupuesto analizador de agua conectado a IoT.	87

RESUMEN

Este proyecto se realiza en colaboración con la ONGD y asociación universitaria Ingeniería Sin Fronteras País Vasco – Euskal Herriko Mugarik Gabeko Ingeniaritza. Esta organización ha participado en varios proyectos en El Salvador vinculados con la gestión y la calidad del agua. Este contexto unido al interés tanto de ISF-MGI como personal, de trabajar en claves de conocimiento abierto y open source, es lo que motivó el presente proyecto en el que se ha diseñado un analizador de agua de bajo coste con hardware y software open source.

Los objetivos fijados en este proyecto son, la medición y envío de tres parámetros vitales para determinar la calidad del agua. Para esto se ha diseñado un termómetro sumergible, se ha adaptado un pH-metro comercial y se ha diseñado un turbidímetro donde se han planteado tres hipótesis para realizar las mediciones. Junto a estos tres parámetros se ha implementado un display para el control y visualización insitu, y un módulo ethernet para realizar las comunicaciones con una plataforma de Internet of Things, permitiendo la visualización y control del sistema desde internet.

Finalmente, los resultados obtenidos cumplen con los objetivos planteados, y de los tres métodos de medición nefelométricas queda demostrado que en uno de ellos se cumple la hipótesis planteada en un rango de 30-500NTU y se demuestra que es necesario adaptar el circuito acondicionador para cada método variando la ganancia obtenida de cada receptor de luz infrarroja. Junto a esto, se ha establecido la comunicación con la plataforma en internet, controlando el sistema remotamente y obteniendo los datos en un intervalo inferior a un segundo.

LABURPENA

Euskal Herriko Mugarik Gabeko Ingenieritza ura eskuratzeko edo berrerabiltzeko hainbat proiektu egin dira El Salvador herrialdearentzako, errekurtsu honen kontrol eta banaketa eskasiaren erantzunkizun moduan. Honen ondorioz, ura analizatzeko beharra sortzen da, bertan egin diren proiektuekin lortzen den ur kalitatea neurtzeko. Honetarako, Internet of Things teknologia konektatuta, kostu gutxiko ur analizatzailea diseinatu egin da.

Uraren kalitatea zehazteko ezinbestekoak diren hiru ezaugarri neurtzea eta bidaltzea da ondorengo proiektuaren helburua. Helburua betetzeko, diseinatu egin da urperatu daitekeen termometro bat, implementatu egin da merkatuko ph-metro bat, eta turbidimetro bat diseinatu egin da hiru neurketa metodoen funtzionamendua frogatzeko hipotesi moduan. Hiru sentsoreen neurketak bistaratzeko display bat erabili egin da eskuzko funtzionamendurako, eta ethernet modulu bat gehitu egin zaio sistemari internetera konektatzeko eta bertatik bistaratzeko, kontrolatzeko eta datuak gordetzeko.

Azkenik, lortutako emaitzekin, hasieran planteatutako helburua bete egin dela esan daiteke. Bestetik, hiru hipotesietatik demostratuta gelditzen da, lehenengo hipotesia ontzat eman daitekeela 30-500 NTU tarteko neurketetan, eta neurketa metodo bakoitzerako, zirkuitu egokitzaille espezifiko bat behar dela infragorriak detektatzen duen hargailuaren etekina aldatzeko aukeratutako metodoaren arabera. Honekin batera, plataformarekin komunikazioa ezartzea lortu egin da, sistema urrunetik kontrolatuz eta datuen monitorizazioa segundu bat baino gutxiagoko denbora tartean jasoz.

ABSTRACT

Engineering Without Borders of Basque Country has carried out a multitude of projects to obtain and reuse water in the Republic of El Salvador, due to its poor sanitation, control and distribution of this resource. Following this, the need arises to carry out an analysis of the water quality of the systems used, so a low cost analyzer connected to the Internet of Things has been designed.

The objectives set in this project are the measurement and delivery of three vital parameters to determine water quality. For this, a submersible thermometer has been designed, a commercial ph-meter has been adapted and a turbidimeter has been designed where three hypotheses have been proposed to carry out the measurements. Together with these three parameters, a screen for the control and visualization of the data has been implemented and also an ethernet module to connect with a platform of Internet of Things, allowing the visualization and control of the system from the internet.

Finally, the results achieved the stated objectives, and of the three methods of nephelometric measurement it is demonstrated that in one of them the hypothesis is achieved in a range of 30-500NTU. It is demonstrated that it is necessary to adapt the conditioning circuit for each method varying the gain obtained from each infrared light receiver. Along with this, communication with the platform on the Internet has been established, controlling the system remotely and obtaining the data in an interval of less than one second.

1 - MEMORIA

1.1 - INTRODUCCIÓN

El presente proyecto surge a partir de los contactos con Ingeniería Sin Fronteras País Vasco-Euskal Herriko Mugarik Gabeko Ingeniaritza (ISF-MGI). Para su realización se ha creado un grupo de trabajo multidisciplinar donde se han tratado conocimientos de Química, Telecomunicaciones y Electrónica.

El “Analizador de agua conectado a IoT” tiene como principal objetivo el análisis de las aguas de salida de unas biojardineras para evaluar la posible reutilización de esta agua con fines agrícolas.

La propuesta inicial del trabajo se diseñó inicialmente como estudio para su posible instalación en los biofiltros que se están diseñando para la depuración de aguas grises procedentes de las cafeterías de la Universidad de El Salvador (UES).

El documento se divide en los siguientes apartados:

- **Objetivos y alcance:** Se define de manera concreta en que consiste el proyecto, junto con la finalidad y la motivación que ha llevado a ISF-MGI a la realización de este trabajo.
- **Contexto:** En este punto, se expone la situación de la República de El Salvador, con objetivo de dar a conocer su pasado, presente y futuro analizando la situación socioeconómica del país, con el fin de detallar las razones que han movido a organizaciones, voluntarios y voluntarias de todas las partes del mundo a desarrollar proyectos de cooperación internacional en intento por revertir la situación que hoy en día viven muchos países del Sur Global.
- **Beneficios:** En este apartado se explicarán las aportaciones que se harán a nivel social, económico y tecnológico.
- **Marco teórico:** En él, se dan las bases teóricas que se han seguido para la realización del mismo, junto con las características que debe albergar el proyecto definidas por ISF-MGI. Entre ellas, se definirán las especificaciones técnicas de cada componente que se ha utilizado, ligado a un estudio de la misma con las posibles alternativas en el mercado.
- **Diseño e implementación:** Muestra los pasos que se han seguido a nivel de Hardware y Software para el correcto funcionamiento del sistema.
- **Metodología:** Se define el proceso que se ha seguido para la realización de las pruebas y comprobaciones necesarias para obtener unas conclusiones fiables.
- **Análisis de resultados:** Una vez obtenidos, se han estudiado para definir la viabilidad del proyecto.

- **Presupuesto:** En este apartado, se concretan los costes y beneficios económicos del proyecto, junto a la financiación que se obtendrá para llevarlo a cabo.
- **Análisis de riesgo:** En este punto, se expone el informe realizado con el objetivo de aumentar la seguridad del sistema, detallando los riesgos internos como externos que podría generar el proyecto, junto a las posibles soluciones que se pueden aplicar para reducirlos.
- **Condiciones de uso:** Se relatan las condiciones económicas, técnicas y administrativas que ha seguido el proyecto.
- **Conclusiones:** Por último y teniendo en cuenta todos los apartados anteriores se mencionan las conclusiones globales del trabajo, aclarando la viabilidad del mismo.

1.1.1 - Objetivos y alcance

El objetivo general del presente proyecto es:

Contribuir a la difusión de conocimiento sobre equipamiento de análisis de aguas de bajo coste que brinde a toda persona interesada un recurso sencillo, económico y fiable para determinar el estado del agua.

Este objetivo general se concretará en seis objetivos específicos alcanzables:

Ob.1. Estudio del contexto en el que se enmarca el proyecto. Conocer la realidad del pueblo salvadoreño adaptando el diseño de este a las necesidades que se presenten.

Ob.2. Diseño, desarrollo e implementación de un analizador de aguas de bajo coste elaborado con tecnologías abiertas.

Ob.3. Diseño, desarrollo e implementación de sistema de comunicación para el almacenamiento de datos y que permita su posterior análisis de forma remota.

Ob.4. Desarrollo de una documentación que permita la réplica del dispositivo desarrollado por cualquier persona interesada (open knowledge).

Ob.5. Análisis de los resultados obtenidos. Definir la precisión, sensibilidad, linealidad, repetitividad y el rango, en el que es capaz de trabajar el analizador de agua.

Ob.6. Definir de forma detallada las limitaciones que se han tenido durante el proceso para fomentar una continuación de este en un futuro.

Una vez expuestos los objetivos, se detallan a continuación las condiciones para las que se ha enfocado el diseño del analizador de agua.

- **Analizador de bajo coste:** El proyecto responde a la necesidad de analizar el agua siempre y cuando esto suponga un ahorro respecto al precio que les supone en la actualidad analizar las muestras en el laboratorio del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador.

- **Creative Commons:** Con intención de impulsar la investigación y el desarrollo en el análisis de agua, se ha realizado acorde con la filosofía Open Software y Hardware. Junto a esto, se ha intentado dar las herramientas para que el proyecto pueda ser reproducido y mejorado en un futuro.
- **Ubicación:** Se ha diseñado para ser implementado en el campus de la Universidad de El Salvador (UES), pudiendo obtener muestras de las biojardineras encargadas del filtrado del agua que se instalaron para la reutilización del agua de cinco cafeterías.
- **Finalidad del agua analizada:** Para fijar los niveles de precisión que se deben cumplir y las normativas a seguir, se establece el riego de cultivos como la única finalidad para la que podrá ser usada.
- **Limitaciones personales:** Se ha desarrollado el proyecto siendo consciente de las limitaciones tanto técnicas, en las materias de telecomunicaciones o en aspectos químicos, como las limitaciones temporales, al tratarse de un trabajo de fin de grado.

1.1.2 - Justificación

Todos los proyectos presentan distintos enfoques, los cuales pueden ser, sociales, económicos o técnicos. Este proyecto, aparte de querer contribuir en el aspecto económico y técnico, pretende también tener en cuenta el ámbito social.

- **Aspecto Social:**

Como se explicará en los próximos apartados, El Salvador presenta un problema grave con el tratamiento del agua. La causa principal, recae en la falta de infraestructuras para su correcto procesamiento, estando contaminada el 90% del agua de todo el país.

El problema, se ve agravado en los salvadoreños y salvadoreñas que residen alejados de los espacios urbanos, disminuyendo notablemente la posibilidad de disponer de un tratamiento de las aguas por parte del gobierno. La posibilidad de un sistema de tratamiento de aguas mediante biojardineras, capaz de trabajar al margen de la red de alcantarillado, unido a la recopilación de datos mediante el presente analizador, brinda la posibilidad de disponer de un control y un tratamiento del agua.

- **Aspecto Económico:**

En el ámbito económico se pueden mencionar dos beneficios:

En primer lugar, el consumo de agua bajaría sustancialmente gracias a la reutilización del agua. Con el filtrado realizado por las biojardineras se puede estimar que la eficiencia de filtrado de estas corresponde al 90%. Convirtiendo de esta manera el agua ya usada, casi en su totalidad, en agua para el riego.

En segundo lugar, la posibilidad de cultivar se ve agravado notablemente en casi cualquier zona, consiguiendo que la necesidad de importar alimentos se reduzca o desaparezca por completo, siendo autosuficientes.

- Aspecto Técnico:

Entre las mejoras técnicas que ofrece este trabajo, se pueden encontrar un nuevo diseño de un turbidímetro, que usa rayos infrarrojos y la reflexión de las partículas suspendidas para fijar el nivel de turbidez del agua, y las comunicaciones entre el microcontrolador Arduino Mega y la plataforma de “Internet of Things” para el análisis de datos de forma remota.

1.2 - CONTEXTO

El objetivo principal de este trabajo es servir de punto de partida para el futuro desarrollo de equipos autónomos de bajo coste para el análisis de la calidad de las aguas.

El análisis de aguas es un proceso complejo ya que, para ser llevado a cabo de forma exhaustiva, son muchos y muy diversos los parámetros a analizar requiriendo, cada uno de ellos, de sensores y técnicas específicas.

El artículo 93 del Decreto No. 50 de 1987, de la Republica de El Salvador, establece que “Toda industria nueva o existente debe, dentro de un plazo de seis meses de la vigencia de este Reglamento, proporcionar la información necesaria que permita evaluar su aporte de aguas residuales industriales al alcantarillado en lo referente a cantidad, calidad, sólidos en suspensión, pH, temperatura y presencia de sustancias nocivas, debiendo cumplir con los límites establecidos en los artículos del 80 al 87 de este Reglamento.” [1]

En este primer acercamiento se medirán sólo algunos de ellos, siendo objeto de futuros proyectos, la ampliación de las técnicas e instrumental de análisis. Los límites para poder determinar el estado del agua, se fijará según lo establece el anterior Decreto en la siguiente tabla titulada, “Normas deseables para aguas crudas superficiales que solamente requieren sistemas convencionales de tratamiento”:

Tabla 1.1 Normas deseables para aguas crudas superficiales que solamente requieren sistemas convencionales de tratamiento. [1]

PARAMETROS	UNIDAD	RANGO DE VALORES	
		Mínimo	Máximo
DBO Prom. Mensual	(mg/L)	1,5	2,5
DBO / muestra	(mg/L)	3	4
Coliformes Pro. men.	(NMP/100)	50	5000
OD	(mg/L)	4	6,5
PH		6,5	9,2
Cloruros	(mg/L)	50	250
Color	(unidades)	20	150

Turbidez	(<i>unidades</i>)	10	250
Fluoruros	(<i>mg/L</i>)	1,5	3
Compuestos Fenólicos	(<i>mg/L</i>)	0	0,005
Sustancias Toxicas		Ausentes	

1.2.1 - Parámetros Analizados

Se han analizado los siguientes parámetros:

- Temperatura:** Este valor condiciona el resto de las mediciones. Por lo tanto, se ha utilizado un termómetro sumergible, capaz de determinar los grados a los que se encuentra el agua en el momento de tomar el resto de medidas. De esta forma, se estudia la viabilidad del resto de pruebas. Esto se debe a que una temperatura por encima, o inferiores a unos niveles, varia los criterios para determinar la calidad de la muestra que se esté analizando, a causa de los cambios en la estructura interna del agua.

Múltiples informes, entre ellos el mismo Decreto citado anteriormente, hace referencia a la utilización del parámetro de la temperatura como factor determinante a la hora de establecer la calidad del agua, especialmente, la calidad de las aguas para propagación piscícola.

A pesar de este motivo, no se usará la temperatura para fijar el nivel de una muestra de agua. Para poderla tener en cuenta, se debería realizar la medición en el terreno sin que le diera tiempo a la muestra a enfriarse o calentarse y el analizador que se ha diseñado no contempla esta alternativa.

- pH:** Parámetro químico que define la cantidad de iones de hidrogeno en una disolución. Esté, indican la acidez o alcalinidad de un líquido. Para poder expresar la concentración de H^+ presentes, se emplea una transformación logarítmica de la concentración molar de protones, a la que se denomina pH. La que se define mediante la siguiente fórmula matemática:

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

Como se puede apreciar en la formula, cuanto mayor sea la concentración de iones de hidrogeno en la disolución, menor será el valor de pH. Al tratarse de una transformación logarítmica inversa, por cada variación unitaria en la escala de pH, representa un cambio de diez veces la concentración de iones en el agua [2].

La escala de pH se extiende desde 0, siendo muy ácido, al 14, muy alcalino, siendo el 7 la neutralidad a 25°C. Según el Decreto citado anteriormente, se le establece un valor recomendado mínimo de 6.5 y un máximo admisible de 9.2.

Los iones de hidrógeno forman parte de la mayoría de las reacciones químicas en el agua y el suelo. Por lo que dicha concentración influye en la solubilidad de los

fertilizantes, las formas iónicas de los elementos, la disponibilidad de los nutrientes a las plantas y la estabilidad de los quelatos entre otros.

Valores excesivamente altos, puede resultar en deficiencia de nutrientes, como el hierro. Por otra parte, se debe tener en cuenta que un pH por encima de 7 puede ocasionar obstrucciones de emisores, debido a la precipitación de sales [3]. En contraposición, valores demasiado ácidos podría dar lugar a la toxicidad de los micro-nutrientes y daños en el sistema radicular de las plantas.

- **Turbidez:** Este parámetro físico es de gran importancia sanitaria. Permite realizar una aproximación del contenido de materias coloidales, minerales u orgánicas, por lo que puede utilizarse como indicio de contaminación [4]. La turbidez es una medida del grado en el que el agua pierde su transparencia, a causa de la presencia de partículas en suspensión [5].

Los parámetros más comunes que influyen en la turbidez de una disolución son los siguientes:

- Fitoplancton.
- Sedimentos procedentes de la erosión.
- Sedimentos resuspendidos del fondo.
- Descarga de efluentes.
- Crecimiento de las algas.
- Escorrentía urbana.

Elevados niveles de turbidez pueden proteger a los microorganismos presentes, de los tratamientos de desinfección, estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de cloro. Los hallazgos de radioactividad en agua, también se vincula a los sólidos en suspensión y las materias disueltas, pudiendo ocurrir que el plancton bioconcentre radioisótopos. A su vez, se ha llegado a vincular un aumento de la turbidez y el riesgo de hallar quistes *Giardia* y *Cryptosporidium* [6].

La velocidad de sedimentación de las partículas pequeñas, inferiores al micrón de diámetro, es muy baja, por lo es necesario un tratamiento para su eliminación. Aquellas partículas superiores a un micrón se sedimentan de forma espontánea. Estas partículas pueden ser inorgánicas, como arcilla o fango, u orgánicas, como bacterias, parásitos, algas, zooplancton, ácidos fúlvicos y coloides húmicos [7].

Las actividades humanas generan efluentes cargados de estas partículas, junto a otras sustancias que pueden combinarse con estas, tanto en el agua, como en las plantas y redes de distribución.

La medición de este parámetro será de gran utilidad realizarla previamente a la entrada del líquido en el sistema, para poder tener conocimiento de la calidad del agua de ingreso y poder seleccionar el tratamiento adecuado, en caso de que aún este no haya sido diseñado o rediseñar el actual mejorando las etapas que se ven involucradas en el proceso de tratamiento de aguas grises.

Se ha de tener en cuenta que el objetivo del agua analizada será única y exclusivamente con fines irrigatorios, y en ningún caso se podrá determinar la potabilidad de la misma. Varios documentos públicos establecen que la turbidez no tiene importancia sanitaria. Por lo que es necesario practicar un enfoque de calidad total con indicadores directos para controlar el riesgo de contaminación fecal y química.

El valor de la turbidez se mide en NTU (*Unidades Nefelométricas de Turbidez*) mediante nefelómetros o turbidímetros capaces de medir la intensidad de luz dispersada a 90 grados del rayo de luz que atraviesa la muestra de agua.

Finalmente, el sistema implementa la tecnología “*Internet of Things*” (IoT), con objetivo de guardar, los datos obtenidos y realizar una posterior investigación del funcionamiento de los filtros, en el que poder ver su evolución en el tiempo, conectado todas las estaciones de estudio. En este primer contacto se han realizado las comunicaciones y el almacenamiento en una plataforma de “*Open Source*” llamada “*Thingier.io*”, desde la que se podrá tener acceso remoto a las mediciones que se hayan o se estén realizando.

Este proyecto, a pesar de ser apropiado para cualquier país, se han realizado modificaciones para adaptarlo a un objetivo en concreto. El sistema diseñado es la continuación de otro proyecto anterior, el cual se expone en el apartado 2.5 Antecedentes con mayor exactitud.

En dicho trabajo, con objetivo de reutilizar el agua en la República de El Salvador, se diseñaron y se implementaron diferentes biofiltros en la universidad del país. Por lo tanto, se han seguido la legislación de este país a la hora de fijar los límites para determinar la calidad del agua.

Los dos proyectos nacen de ISF-MGI, con ayuda de la Universidad del País Vasco (EHU/UPV), y han sido llevados a cabo para colaborar con la situación que sufre El Salvador, expuesta en los siguientes apartados.

1.2.2 - República de El Salvador

La República del Salvador tiene la mayor densidad de toda América, con una extensión de 21 014km² y una población de 6.188.440. El clima es cálido tropical, que debido a su ubicación son frecuentes las variaciones del mismo.

San Salvador, es la capital de El Salvador donde se encuentra, además de la universidad para la cual se ha diseñado el sistema, el poder económico y político.

Para conocer la situación que atraviesa el país y su desarrollo, se van a analizar los siguientes aspectos:

- Historia reciente.
- Situación política y economía.
- Demografía.
- Condición climática e hidrográfica.

1.2.2.1 - Historia reciente

En el siglo XIX El Salvador formaba parte de la corona española como una colonia más en América. Diferentes movimientos independentistas en dicho continente, unido a unas situaciones económicas y políticas precarias, dio lugar a una primera revolución en 1811, pero no fue hasta 1814 cuando comenzó la revolución que llegó a su fin en 1821, cuando junto a otras colonias consiguieron su independencia.

En un principio, en 1822, el Imperio de México se apropió de El Salvador a pesar de las ideas republicanas que tenía el país. No fue hasta 1823 cuando abdicó Agustín de Iturbide, dando lugar a una independencia absoluta.

Después de dos guerras civiles (1826-1829 y 1830-1842) y un alzamiento indígena, el presidente de Centroamérica, Francisco Morazán, deja el poder, dando lugar a que el 2 de febrero de 1841 la República de El Salvador se convierte en un país soberano e independiente.

Entre 1871 y 1931 los distintos gobiernos liberales, fomentaron la producción de café en todo el territorio. Ayudado especialmente por los Estados Unidos, para la creación de nuevas infraestructuras, desplazando de esta manera la necesidad de las inversiones de los británicos.

En 1929 la economía del país entró en crisis a causa de la caída del precio del café en el mercado global. Esto llevó a que el general Maximiliano Hernández Martínez mediante un golpe de estado, se hiciera con el poder del país. Impuso reformas ultraconservadoras y autoritarias contra las que Feliciano Ama organizó un levantamiento, sin éxito, en 1944. El Salvador fue dirigido por gobiernos militaristas, hasta que en 1979 una huelga provocó la sustitución del general.

Finalmente, de 1980 a 1992, El Salvador estuvo sumido en una guerra civil que causó 75 000 muertes tras 12 años de conflicto. En 1984 se celebraron las primeras elecciones democráticas, pero el conflicto no terminó hasta que el 16 de enero de 1992, en México, firmaron la paz el FMLN y ARENA, que pertenecen a partidos políticos de la actualidad.

1.2.2.2 - Situación política y economía

Según se estipula en la constitución de 1983, el país consta de un sistema político pluralista, formado por diferentes partidos políticos. En la actualidad los partidos que firmaron la paz en 1992, forman las dos mayores fuerzas políticas en el país, FMLN y ARENA.

Desde el 1 de junio de 2014 hasta junio de 2019, Salvador Sánchez Ceren, fue el presidente del gobierno, siendo dirigente del partido Frente Farabundo Martí para la Liberación Nacional (FMLN). Fue uno de los fundadores de la organización político-militar ya desaparecida FPL (Fuerzas Populares de Liberación Farabundo Martí) la cual fue la primera organización armada de izquierda de El Salvador.

Desde el 1 de junio de 2019 hasta la actualidad, Nayib Bukele, fue elegido presidente con el 53,10% de los votos. Anteriormente, fue alcalde de Nuevo Cuscatlán y de San Salvador en, 2012 y 2015 respectivamente, bajo la bandera del FMLN. Para las elecciones de 2019 Bukele participó con el partido Gran Alianza por la Unidad Nacional (GANU), siendo el primer presidente, desde el final de la guerra civil que no representa a ninguno de los dos partidos principales (ARENA o FMLN).

Gran Alianza por la Unidad Nacional es un partido legalizado en 2010 por el Tribunal Supremo Electoral. Se define como partido conservador y de derecha popular, siendo la mayoría de sus integrantes procedentes del partido de la derecha tradicional Alianza Republicana Nacionalista (ARENA).

El país está distribuido en 14 departamentos en los que, a pesar de tener la obligación de colaborar con el estado central, tienen autonomía económica, técnica y administrativa en los que se celebran elecciones cada 3 años.



Figura 1.1 Distribución de los diferentes departamentos de la República de El Salvador. [8]

Respecto a la situación económica, a causa de los sucesivos gobiernos del partido político ARENA fomentó iniciativas de mercado libre, privatización del sistema bancario, telecomunicaciones, las pensiones públicas, eliminación del control en el precio, lo que llevo a una subida constante del PIB del país.

Junto a estas medidas y dicho crecimiento, también genero desigualdad económica. Según los informes realizador por el país, la quinta parte de la población más rica, acumula el 45% de las ganancias del país, en comparación a la quinta parte más vulnerable que acumulo únicamente 5,6%.

En 2001, el dólar estadounidense se convirtió en la moneda oficial junto con el colón salvadoreño, lo que llevo a un incremento de las operaciones con el exterior. Llego a tal punto la importancia del dólar, que el colón fue desapareciendo paulatinamente hasta que dejo de circular.

El país pasó de las plantaciones de café, a orientar su economía en la manufactura y los servicios, entre los cuales se encuentran los productos del petróleo, el tabaco, los alimentos o bebidas y las fábricas de muebles y textiles. Estos últimos, son los que más beneficios genera, teniendo como principal objetivo Estados Unidos.

Tabla 1.2 Exportaciones e importaciones de la República de El Salvador

Exportaciones a		Importaciones de	
País	Porcentaje	País	Porcentaje
Estados Unidos	66%	Estados Unidos	43%
Comunidad del Caribe	26%	Guatemala	8,20%
México	1%	México	7,80%
España	1%	Unión Europea	7%
Otros	6%	Otros	33,60%

En la tabla anterior se muestran las exportaciones e importaciones realizadas a cada país. Como se puede observar la influencia de Estados Unidos en el país es muy grande desde la época colonial hasta la actualidad.

El problema surge, a causa de que el beneficio que se aprecia en los datos, únicamente se concentra en una élite, la que tiene relación con el poder político del país. Hasta tal punto que los bancos salvadoreños se han expandido por toda Centroamérica, convirtiéndose en los más grandes de la región.

Parte importante para la economía salvadoreña, el 17,1% del PIB del país procede de las remesas que los salvadoreños que emigraron a Estados Unidos y envían a sus familias residentes en El Salvador. El número de salvadoreños que emigran cada año va en aumento, lo que provoca que las remesas sigan subiendo año tras año.

Respecto al balance energético del país, El Salvador presenta las energías renovables como primera opción. Más de la mitad de toda la energía, procede de fuentes hidroeléctricas, un 30,7% y la geotérmica, un 24,7% lo que conlleva un porcentaje total del 55,4%. A estas, le sigue la energía obtenida por el petróleo, con un total del 40,9%.

Comparando los datos con España, la República de El Salvador presenta un gran interés por las energías renovables, ya que en España únicamente corresponden al 13,9% de toda la energía consumida en el país.

1.2.2.3 - Demografía

El Salvador presentaba en el año 2000, al igual que en los países del Sur global, una pirámide demográfica progresiva, en la que se observaba una base muy ancha y una cima

muy angosta. Es decir, la mortalidad y la natalidad del país se mantenían extremadamente altas.

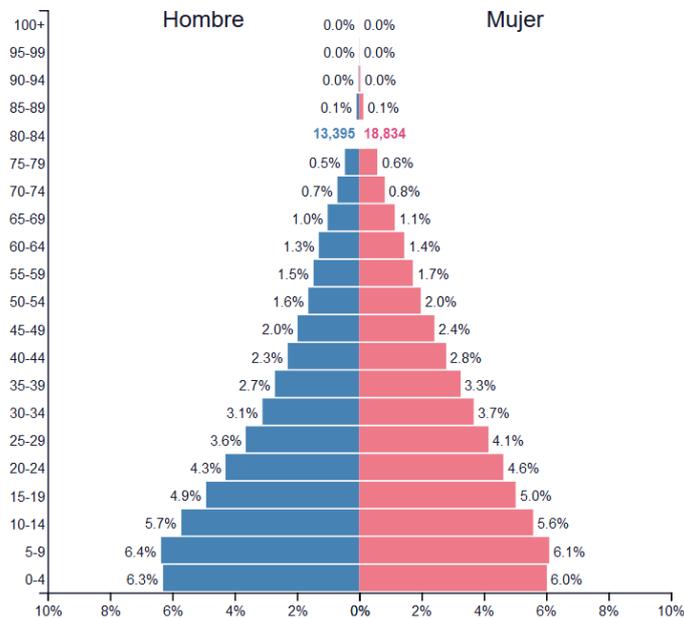


Figura 1.2 Pirámide demográfica de la República de El Salvador en el año 2000 [9]

En los últimos años dicha tendencia ha cambiado considerablemente pasando a describir una demografía estable donde los valores de mortalidad y natalidad se mantienen constantes.

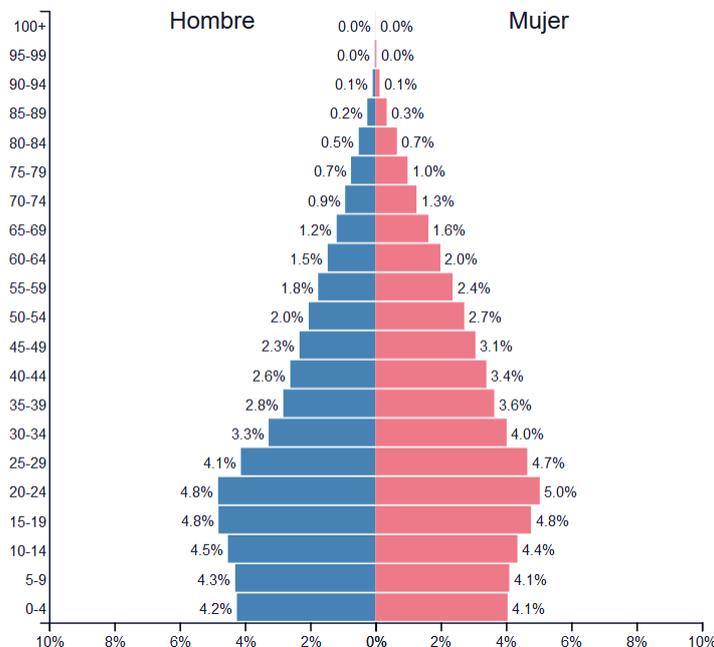


Figura 1.3 Pirámide demográfica de la República de El Salvador en 2018 [9]

Si comparamos los datos con los obtenidos por la organización mundial de la salud (OMS) en países como España, la pirámide que se refleja es de tipo regresiva, en la que se observa que la base se reduce sustancialmente debido a una disminución notable de la natalidad del país, lo que conlleva un envejecimiento del mismo.

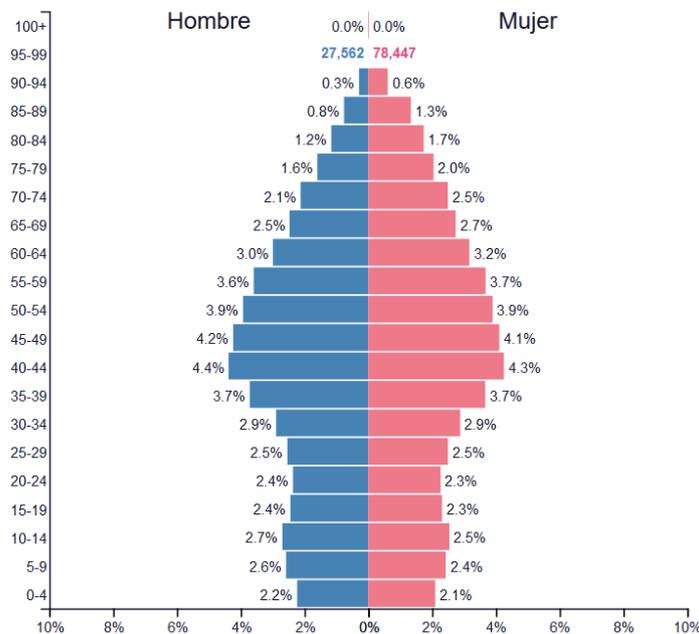


Figura 1.4 Pirámide demográfica de España en 2018 [9]

Como se muestra en los datos anteriores, la evolución es clara, ya que ha conseguido una disminución muy significativa de la mortalidad en 18 años. Para analizar la situación del país, se comparan a continuación los datos de los índices de desarrollo obtenidos por PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) de España y El Salvador.

Tabla 1.3 Índices de desarrollo de España y El Salvador [10]

	El Salvador	España
Esperanza de vida	73,8	83,3
Años de enseñanza	12,6	17,9
PIB	6,868	34,258
Número de homicidios (por cada 100.000 personas)	82,8	0,6
Acceso a internet (%)	29	80,6
Población(millones)	6,4	46,4
Media de edad	25,8	43,2

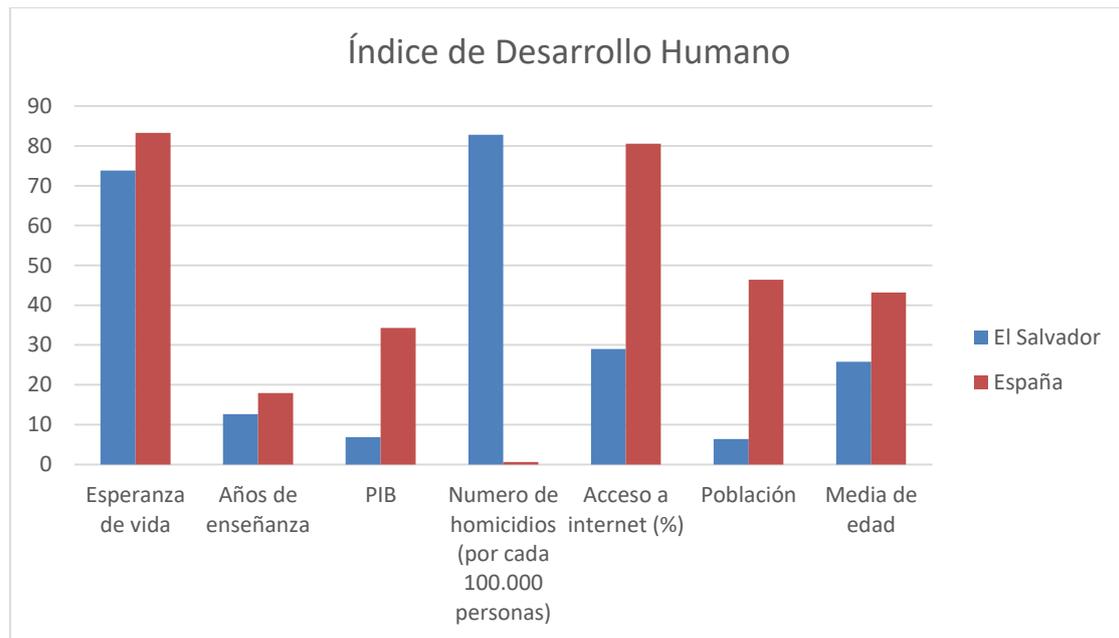


Figura 1.5 Gráfico sobre el índice de desarrollo humano de El Salvador y España [10]

En los datos anteriores se muestran los medidores más significativos con la intención de dar una imagen sobre el nivel de desarrollo que atraviesa el pueblo de El Salvador. Los factores más críticos y que hacen que se encuentre en el puesto número 121, son, el producto interior bruto, el nivel de delincuencia que genera 82,8 asesinatos por cada 100.000 habitantes, y, por último, que la edad media de la población salvadoreña que corresponde a 25,8 años.

El nivel de delincuencia es el más alto del mundo entre los países que no se encuentran en guerra. Las Maras, especialmente la Mara Salvatrucha 13 (MS-13) y la Mara Barrio 18 (M-18) son las causantes del nivel de inseguridad que se vive en el país. Son muchos los informes que apunta a que el país por su ubicación geográfica, se encuentra entre las rutas utilizadas por los cárteles de la droga, que la trasportan desde Colombia u otros países latinoamericanos hasta Estados Unidos.

1.2.2.4 - Condición climática e hidrográfica

El Salvador se encuentra en una zona de climática tropical, en la que la temperatura se mantiene estable durante todo el año. Por su posición geográfica, el aire del océano pacífico crea cambios importantes en el clima llevando humedad y calor a las costas del país. Desde 1950 a 1990, la temperatura media se ha mantenido en los 24,8°C siendo las temperaturas más bajas registradas en diciembre (23,8°C) y las más altas en abril alcanzando los 32°C.

Las precipitaciones varían mucho durante el año, ya que a pesar de que la media anual sea de 1823mm, realmente, casi en su totalidad se concentran en los meses de mayo a octubre, como se puede apreciar en el siguiente gráfico.

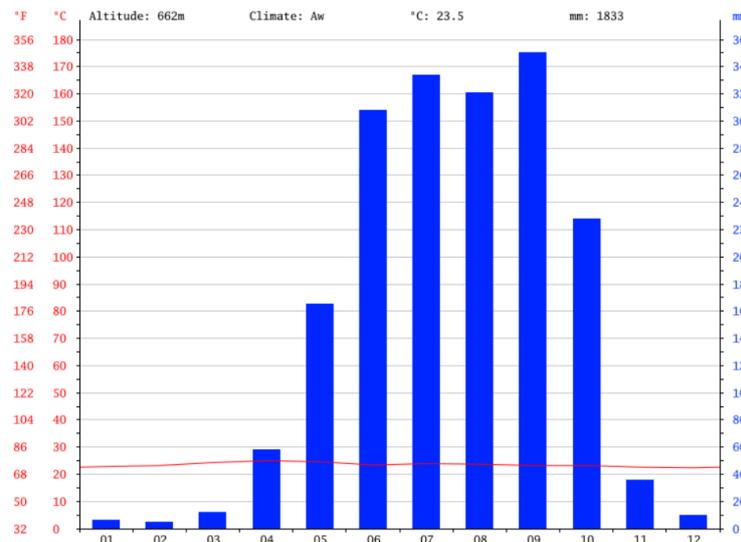


Figura 1.6 Gráfico del número de precipitaciones (mm) por meses. [11]

Como se puede ver en el gráfico anterior, las lluvias están concentradas en seis meses. Entre ellos, los meses centrales son los que provocan graves inundaciones en todo el país. Situación que se ve agravada a causa de la deforestación, teniendo un área forestal del 12,8% de todo el territorio.

Una de las causas de este hecho reside en la explotación agrícola para la producción de café que realizó durante muchos años el país. Contribuyendo a la tala de árboles para posteriormente utilizar la tierra con fines agrícolas.

Junto a las precipitaciones el país cuenta con recursos hidrográficos que se estiman en 17,8km³ entre 360 ríos y 59 lagos. Por lo que el problema al que se enfrenta El Salvador se definen en las siguientes secciones [12]:

- Derecho humano al agua potable y el saneamiento: En la Resolución 64/292, la Asamblea General de las Naciones Unidas, en julio de 2010, reconoció explícitamente el derecho humano al agua potable el saneamiento como “derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos”. Esta resolución también exhortó a los Estados y organizaciones internacionales “a intensificar los esfuerzos por proporcionar a toda la población un acceso económico al agua potable y el saneamiento”.
- Escasez de agua y desperdicio: A pesar de tener un promedio de precipitaciones de 1823 mm, el problema es la distribución de está a lo largo del año. De hecho, durante seis meses solo se recibió un 7% del promedio, es decir, un acumulado de 134 milímetros. De esos 6 meses, en cuatro el promedio cae hasta los 28 milímetros, lo que supone un 1.5% de la lluvia anual.

En los meses más copiosos dispone de un exceso de lluvia que no se aprovecha e incluso son tan altas que hacen al “Embalse 15 de Septiembre” descargar provocando graves inundaciones en el Bajo Lempa.

Por el contrario, en los meses más secos esas inundaciones se convierten en una disminución del caudal estrepitosa y en algunos casos incluso llegan a secarse por completo.

- Contaminación de ríos. Informes del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de La República de El Salvador demuestran que de los 123 sitios distribuidos en 55 ríos no se ha encontrado ningún sitio con calidad excelente del agua, lo que limita la vida acuática.

Estudios del año 2017 muestran como únicamente el 32% de los sitios donde se realizaron las mediciones tenían una calidad del agua buena, lo que corresponde a que únicamente disponen de una tercera parte de los recursos hídricos, tanto para el consumo humano, agrícola o ganadero, sin que esto supusiera un riesgo para la salud.

- Contaminación y sobreexplotación de acuíferos: El agua subterránea es una de las fuentes de abastecimiento de agua potable, por tener una calidad mucho mayor al de las aguas superficiales ahorrando costes de tratamiento y distribución. Sin embargo, está puede variar significativamente. Un estudio realizado en el AMSS (*Área Metropolitana de San Salvador*), donde reside una tercera parte de la población total del país y donde se ubica la universidad para la que se está diseñando el actual proyecto, se analizaron 20 pozos de los cuales en 2 la calidad fue mala, en 12 fue regular y únicamente resulto buena en seis, sin llegar a registrar una calidad de agua excelente en ninguno de los casos.

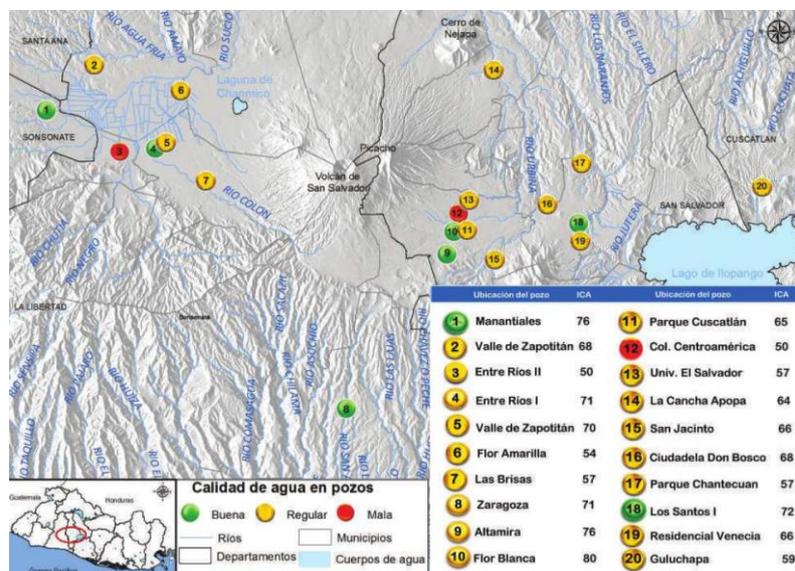


Figura 1.7 Calidad de agua en pozos del AMSS y alrededores. [12]

- Extracción de áridos y alteración de cauces y ríos.
- Degradación de humedales (lagos, lagunas y esteros).
- Adaptación al cambio climático.
- Cuencas y acuíferos transfronterizos.

Por otra parte, la formación de ciudades ha hecho aumentar la temperatura en estos lugares como consecuencia de la concentración, aumentando 1,2°C desde 1980.

1.3 - ANTECEDENTES

Si bien no existen antecedentes de este proyecto propiamente dichos, sí que existen diferentes comunidades de conocimiento y datos abiertos (open knowledge y open data) que llevan ya años trabajando en la visibilización y democratización de datos medioambientales.

En este sentido se han encontrado varias experiencias (open wáter project, public lab:open wáter, safecast, ...) que trabajan en el desarrollo de equipamiento para la medición del agua y comparten el conocimiento sobre los distintos métodos para la realización de estas mediciones.

Entre todos ellos cabe destacar los siguientes trabajos en relación con el diseño del turbidímetro:

- “*Construcción con tecnología abierta de un sensor de turbidez de bajo costo*”, por Cristhian Román-Herrera, David Loza- Matovelle, Luis Segura y Reza Dabirian, de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, de Ecuador. [13]

Siguiendo la filosofía open-source han desarrollado un dispositivo capaz de medir la turbidez incorporando componentes de bajo costo y usando tecnologías abiertas como impresoras 3D y Arduino. En este dispositivo se usa LED de luz y un receptor que detecta el haz que atraviesa la muestra de agua a analizar. Obtuvieron un rango efectivo entre 50NTU hasta 650NTU.

- “*An Affordable Open-Source Turbidimeter*”, por Christopher D.Kelley, Alexander Krolick, Logan Brunner, Alison Burklund, Daniel Kahn, William P.Ball y Monroe Weber-Shirk, de la Universidad de Cornell, de Estados Unidos. [14]

El *paper* publicado en la revista “*Sensors*” presenta un estudio detallado de tres métodos que pueden ser usados para la medición de la turbidez dependiendo del número de receptores y emisores en el sistema. En dicho *paper* se hace mención como trabajo futuro a realizar, el dotar al sistema de un módulo “*General Packet Radio Service*” (GPRS) o “*Global System for Mobile communications*” (GSM) para poder enviar los datos a un servidor web.

1.3.1 - Estado del arte

El presente proyecto se ha desarrollado como herramienta de análisis para determinar la viabilidad de un proyecto anterior diseñado por ISF/MGI llamado “*Ur grisen tratamendurako biojardineraren modelakuntza eta simulazioa*” o Modelización y simulación del tratamiento de aguas grises mediante biojardineras por Leire García Oñarte Echevarria de la UPV/EHU. [15]

El objetivo de ese proyecto se centraba en el análisis y diseño del uso de las biojardineras como tratamiento de aguas grises, desde el punto de vista de la Ingeniería Química. El

proceso constaba de dos partes. La primera de ellas consistía en el pretratamiento del agua mediante trampas de grasas. Y en la segunda fase se encontraban las biojardineras que se encargaban del tratamiento biológico.

Para el análisis desde el punto de vista de la Ingeniería Química se desarrolló un modelo matemático capaz de prever la relación entre los sustratos y los microorganismos, en un sistema estable e inestable de los parámetros y teniendo en cuenta la acumulación de lodo para intentar simular unas condiciones lo más cercanas a la realidad posibles. Para esto, se utilizó *Scilab* como herramienta para la simulación del modelo.

Para una mejor comprensión de dicho proyecto, se presenta a continuación el esquema general del sistema de tratamiento mediante biojardineras de las aguas grises:

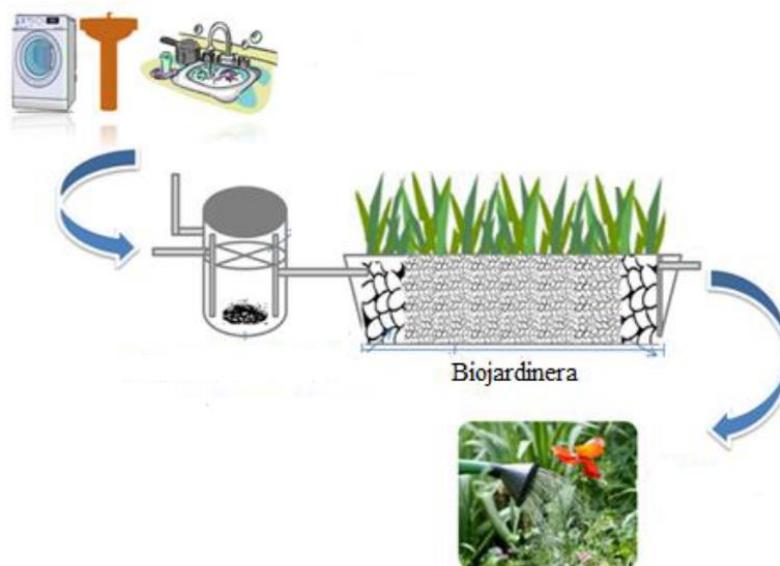


Figura 1.8 Esquema general del tratamiento mediante biojardineras. [15]

2 - MARCO TEÓRICO

En las siguientes líneas se detallarán las partes, por ámbitos de aplicación o áreas, de las que consta el proyecto y el grado de consecución de cada una de ellas con el proyecto total.

2.1 - Descripción general

El presente proyecto consiste en analizar la calidad del agua con una precisión lo suficientemente aceptable, como para poder determinar si la reutilización de la misma en el ámbito de la agricultura es viable o no. Para ello, se ha utilizado el siguiente esquema:

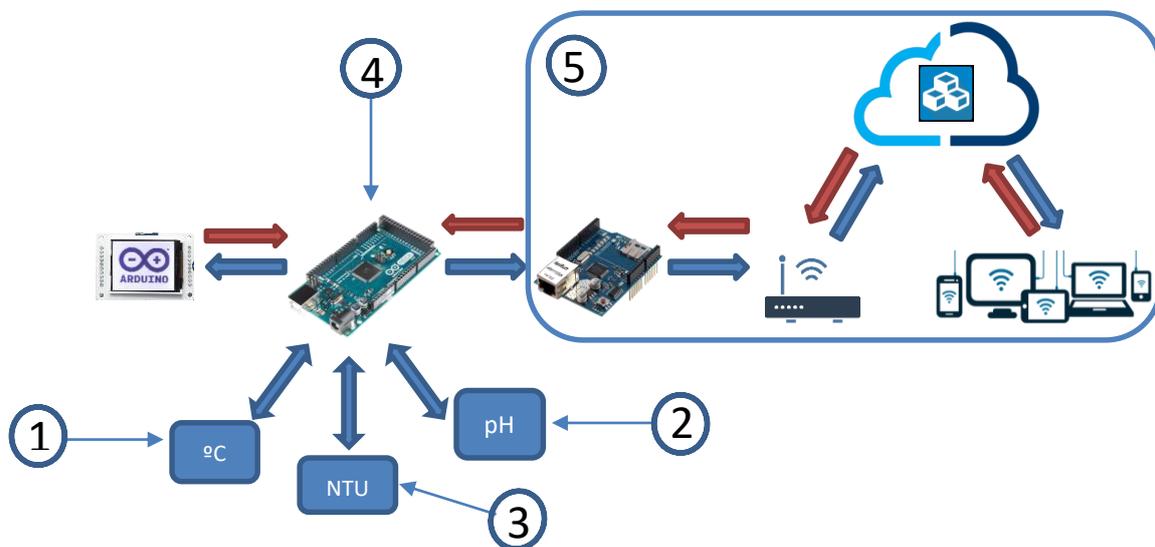


Figura 2.1 Croquis del Analizador de agua conectado a IoT

Como se muestra en la imagen anterior el sistema se compone de cinco partes.

Para la recepción de los parámetros se han diseñado o adaptado tres sensores capaces de medir la temperatura, el pH y la turbidez de una muestra de agua los que se muestran en los apartados 1, 2 y 3. Todos estos sensores junto a un circuito acondicionador envían los datos al microcontrolador.

Este microcontrolador, como se muestra en el apartado 4, se encarga de la recepción, tratamiento y envío de los datos. Para esta función se ha implementado un display para la visualización de los diferentes menús y la visualización in situ de las mediciones, junto a tres botones para poder navegar por los menús.

Por último, el quinto apartado, se encarga del envío de los datos desde el microcontrolador al router mediante un módulo Ethernet, permitiendo la subida de los datos en directo a un servidor web alojado en una plataforma open-source de “Internet of Things” llamada “Thingy.io”. Desde esta, se podrá acceder desde cualquier parte del mundo con acceso a

internet y desde cualquier dispositivo, permitiendo tanto recibir los datos como controlar el sistema remotamente.

Se lleva a cabo este proyecto conjunto, a causa de la necesidad que surge en la República de El Salvador, por la falta de sistemas de tratamiento del agua, junto a la necesidad de realizar un posterior estudio de la fiabilidad y viabilidad del tratamiento de aguas grises mediante biojardineras. Para esta labor, se ha de destacar la colaboración con la Facultad de Ciencias de la UPV/EHU y los profesores Roberto Aguado y Federico Mijangos.

A continuación, se definirá el modelo que se ha seguido para el análisis de las alternativas que se realizara en cada uno de los apartados.

2.2 - Estudio de las alternativas multivariantes

Para llevar a cabo este proyecto, se ha realizado una investigación exhaustiva de diferentes sensores, software y tarjetas de comunicación, con la intención de conseguir lo que más se adecue a los objetivos. Con este fin, se han estudiado diferentes proyectos y plataformas Open Hardware. Finalmente, y teniendo en cuenta las características de cada uno de ellos, se han obtenido las especificaciones técnicas, que se analizarán en los siguientes apartados y mediante los cuales se elegirá la alternativa más favorable.

Para la realización del proyecto se ha llevado a cabo una investigación de todos los componentes que lo conforman. Estos, se han seleccionado teniendo en cuenta los objetivos de este trabajo y los proyectos anteriores mencionados en los antecedentes. Tras recopilar información de los componentes, se han estudiado las especificaciones técnicas acordes con el objetivo general del conjunto del proyecto.

Con todos ellos se ha seguido la siguiente metodología, según la cual la calificación de cada factor entorno a una característica concreta, se le asigna un nivel. Se le asigna el valor más alto a la alternativa que más se ajuste a los objetivos. Y de la misma forma, se le asigna el más bajo a la alternativa que más se aleje. Se repite el mismo proceso para cada característica del estudio, hasta completar la matriz. Finalmente, con la siguiente fórmula, se podrá cuantificar la mejor opción para completar el objetivo de este proyecto.

$$MHB = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{p_i} \quad (2.1)$$

Tras este punto, se describe el marco teórico, características y el análisis de alternativas de cada una de las partes del sistema.

2.3 - Parte 1: Termómetro

La medida de la temperatura indica el grado de calor en el cuerpo del agua. Este parámetro puede incidir en la calidad del agua, al determinar otras propiedades. La temperatura crea variaciones en la estructura interna del agua, en los procesos fisiológicos de los

organismos que provocan variaciones de su metabolismo y dificultan o facilitan la proliferación de ciertos microorganismos. [16]

Entre los parámetros afectados por la temperatura encontramos el pH y la turbidez. Por ejemplo, en el caso del pH, el agua pura tiene un pH de 7 cuando esta se encuentra a 25°C. El aumento de la temperatura provoca que el pH disminuya, y a la inversa. Al incrementar la temperatura, las moléculas tienden a separarse en sus elementos hidrógeno y oxígeno. Un incremento de las moléculas descompuestas se produce más hidrógeno, lo que aumenta el potencial de hidrógeno pH. [17]

Por otro lado, las partículas suspendidas en el agua absorben el calor de la luz del sol, provocando un incremento de la temperatura y reduciendo la concentración de oxígeno. En este caso, la variación de la temperatura es el resultado del incremento de la turbidez en el agua, y no un parámetro que modifique el resultado obtenido de las mediciones de unidades nefelométricas.

Todos los sensores de temperatura realizan la medición al detectar una variación de una propiedad física. Actualmente los sensores de temperatura más usados se dividen en dos grupos:

- Sensores con contacto: Termopares, termistores y RTD.
- Sensores sin contacto: Infrarrojos.

2.3.1.1 - Descripción de alternativas

2.3.1.1.1 Termopares

Sensor formado por la unión entre dos metales diferentes, es un transductor que mide la diferencia de potencial entre un metal y otro. Según los metales empleados, los termopares poseen diferentes rangos de funcionamiento y adquieren diferentes denominaciones. Al medir la diferencia de potencial, se calcula la temperatura, a esto se le denomina el efecto Seebeck.

Estudio de las características:

- Precio económico.
- Resistentes y fiables.
- Gran rango de temperatura: -250°C – 2750°C.
- Capacidad de medir su propia temperatura.
- Se debe asegurar que no existe flujo de calor entre los dos metales.
- Pérdida de precisión a largo plazo a causa del desgaste del aislamiento.
- Respuesta rápida.

2.3.1.1.2 Termistores

Sensor formado por materiales semiconductores capaces de variar su resistividad dependiendo de la temperatura. Se dividen en dos tipos, NTC (al aumentar la temperatura baja la resistencia) y los PTC (al aumentar la temperatura aumentan su resistencia).

Estudio de las características:

- Precio económico.
- Fáciles de usar y adaptar.
- Rango de temperatura limitado a altas temperaturas.
- Utilizadas en aplicaciones de control.
- Las pequeñas variaciones en la temperatura, provocan grandes cambios en el valor de la resistencia.
- Relación entre temperatura y resistencia no lineal.

2.3.1.1.3 RTD

Sensor de temperatura resistivo basado en la variación lineal de la resistencia de un conductor con la temperatura.

Estudio de las características:

- Precisos.
- Estables y de alta reproducibilidad.
- Gran rango de temperatura: -200°C – 850°C .

2.3.1.1.4 Infrarrojos

Sensor optoelectrónico formado por fototransistores capaces de medir la radiación electromagnética que emiten los cuerpos

Estudio de las características:

- Precio elevado.
- Utilizados en situación donde no puede haber contacto con la muestra.
- Capaz de medir en vacío y en movimiento.
- Rango de temperatura: -70°C – 1000°C .
- Respuesta rápida.

2.3.1.2 - Análisis de las alternativas

Para seleccionar el tipo de termómetro se tendrán en cuenta especialmente los siguientes factores: Precio, resistencia, precisión y facilidad de implementación.

En las siguientes líneas, se definen los criterios usados para puntuar la tabla 2.1 que se muestra a continuación.

- Factor económico: Se le asigna un peso del 40% siendo el factor más importante que limite el encarecimiento del coste global del proyecto.
- Resistencia: Se le ha asignado un 30% al estar ligado al factor económico y ambiental. Al optar por un componente más resistente, se pretende ahorrar futuras reparaciones, que dejen inservible el dispositivo hasta que este sea repuesto.
- Precisión: Se le ha asignado un peso del 20%, al no necesitar una precisión alta, llegando a ser una variable que podrá variar un grado de su valor real.
- Facilidad de implementación: Se le asigna un peso del 10%, al ser un criterio a tener en cuenta, pero sin ser excesivamente excluyente.

Tabla 2.1. Análisis de alternativas termómetro

	Termopares	Termistores	Infrarrojos	RTD
Precio 40%	2	3	1	4
Resistencia 30%	3	1	4	2
Precisión 20%	3	1	4	2
Facilidad de implementación %10	3	2	1	4
	2,6	1,9	2,5	3

Los termistores, RTD y los termopares son, con diferencia, los tipos de sensores más accesibles económicamente, situando los sensores de tipo infrarrojos como los más caros por lo que se les ha asignado la puntuación más baja.

Por otra parte, los sensores infrarrojos a la vez de ser los más caros, son los que presentan una mayor resistencia y una alta precisión en sus mediciones. Junto con estos los RTD a su vez también presenta una buena resistencia y una precisión muy alta.

Respecto a la facilidad de implementación, los RTD presentan una instalación muy fácil siendo el PT100, RTD de platino con una resistencia de 100Ω a 0°C , un sensor muy común.

2.4 - Parte 2: pH-metro

Para la valoración de la calidad del agua según el MARN de El Salvador respecto a la calidad de las aguas superficiales, se han fijado tras una revisión de normativas nacionales e internacionales. En dicho informe [18] se determina que el potencial de hidrógeno (pH)

debe encontrarse entre 6,5 y 9,2 pH, como indica también la directiva 98/83/CE del parlamento Europeo y del Consejo [19].

Los pH-metros son sensores capaces de medir la acidez del agua. En este apartado se ha optado por una sonda comercial, debido a su bajo coste y el ahorro del tiempo que sería necesario invertir para diseñarla.

Entre todos los sensores que se han estudiado se han seleccionado los tres que más se ajustaban a los objetivos del proyecto, teniendo todos ellos características muy similares.

2.4.1.1 - Descripción de alternativas

2.4.1.1.1 Electrodo BNC Sonda PH 1

Estudio de las características:

- Sumergible.
- Precisión del $\pm 0,1$.
- Tiempo de respuesta: 5s.
- Precio: 38€.

2.4.1.1.2 SEN0169

Estudio de las características:

- Sumergible.
- Precisión del $\pm 0,1$.
- Tiempo de respuesta <1min.
- Precio: 57€.

2.4.1.1.3 PH-metro auto-ctrl

Este sensor comercial del fabricante auto-ctrl presenta una precisión bastante baja comparándolo con los presentados anteriormente, pero se reduce el coste considerablemente.

Estudio de las características:

- No sumergible.
- Precisión del $\pm 0,5$.
- Tiempo de respuesta <1min.
- Precio: 25€.

2.4.1.2 - Análisis de las alternativas

Para seleccionar el tipo de pH-metro más adecuado, se tendrán en cuenta especialmente los siguientes factores: Precio, resistencia, precisión y facilidad de implementación.

En las siguientes líneas, se definen los criterios usados para puntuar la tabla 2.2.

- Factor económico: Se le asigna un peso del 60% siendo el factor más importante que limite el encarecimiento del coste global del proyecto.
- Precisión: Se le ha asignado un peso del 20%, al ser importante para determinar con precisión la calidad del agua a analizar.
- Resistencia: Se le ha asignado un 15% para aumentar la vida útil del sensor al estar en contacto con el agua.
- Facilidad de implementación: Se le asigna un peso del 5%, al ser un criterio a tener en cuenta, pero donde todos los seleccionados al ser comerciales presentan buenas condiciones.

Tabla 2.2 Análisis de alternativas sensor pH.

	BNC Sonda PH1	SEN0169	pH-metro Auto-ctrl
Factor Económico 60%	2	1	3
Precisión 20%	2	2	1
Resistencia 15%	3	2	1
Facilidad de implementación 5%	3	1	2
	2,2	1,35	2,25

2.5 - Parte 3: Turbidímetro

Para un correcto estudio de la turbidez que presente la muestra, se han seguido las indicaciones recogidas en la normativa UNE-EN ISO 7027-1. En dicho documento se definen parámetros esenciales que deberá cumplir el sensor a diseñar. A continuación, se resume la normativa haciendo hincapié en tres puntos, que han sido indispensables a la hora del diseño del sensor y que serán citados en capítulos posteriores para facilitar la comprensión.

- Marco teórico.
- Metodología.

- Método de medida de la radiación difusa (nefelometría).

2.5.1.1 - Marco teórico. Turbidímetro

Las medidas de la turbidez pueden verse afectadas por la presencia de sustancias disueltas que absorben la luz (sustancias que proporcionan color). Tales efectos pueden no obstante minimizarse llevando a cabo las medidas a longitudes de onda superiores a los 800nm.

Existen dos métodos cuantitativos para la determinación de la turbidez.

- Nefelometría: Medida de la radiación difusa, para baja turbidez.
- Turbidimetría: Un procedimiento para la medida de la atenuación de un haz de radiación, más aplicable a aguas con alta turbidez (por ejemplo, aguas residuales u otras aguas turbias).

Las medidas de turbidez obtenidas conforme al primer método se expresan en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Los resultados generalmente se encuentran en el rango comprendido entre $< 0,05$ NTU y 400 NTU. Dependiendo del diseño y características del equipo utilizado, también puede ser aplicable a aguas de mayor turbidez. Se ha de tener en cuenta que existe una equivalencia numérica entre las unidades nefelométricas de turbidez (NTU) y las unidades nefelométricas de formacina (FNU).

Para un correcto muestreo y almacenamiento de las muestras, todos los recipientes susceptibles de entrar en contacto con las muestras se mantienen en condiciones de escrupulosa limpieza. Se lavan con una solución de ácido clorhídrico o con una solución detergente de limpieza. Deben ser de vidrio o plástico.

Si es inevitable almacenar las muestras, estas se almacenan en un recinto fresco y al abrigo de la luz por un periodo no superior a las 24 horas. Si las muestras se han conservado refrigeradas, se deja que alcancen la temperatura ambiente antes de efectuar las medidas.

Se debe evitar todo contacto entre la muestra y el aire, así como evitar cualquier variación no indispensable de la temperatura de la muestra.

2.5.1.2 - Metodología. Turbidímetro

Una muestra de agua que contiene sustancias no disueltas atenúa la radiación incidente y, además, las partículas insolubles presentes difunden la radiación de forma desigual en todas las direcciones. La difusión de la radiación hacia delante inducida por las partículas modifica la atenuación de tal manera que el coeficiente de atenuación espectral $\mu(\lambda)$ es la suma del coeficiente de difusión espectral $s(\lambda)$ y el coeficiente de absorción espectral $\alpha(\lambda)$:

$$\mu(\lambda) = s(\lambda) + \alpha(\lambda) \quad (2.2)$$

Para obtener el coeficiente de difusión espectral $s(\lambda)$ por sí solo, es preciso que el coeficiente de absorción espectral $\alpha(\lambda)$ sea conocido. Para determinar el coeficiente de absorción espectral de la sustancia disuelta, pueden eliminarse, en algunos casos, las sustancias disueltas por filtración, si bien este proceso puede producir interferencias. Por tanto, es necesario que el informe de ensayo proporcione una comparación de los resultados de la determinación de la turbidez con un patrón de calibrado.

La intensidad de la radiación difusa depende de la longitud de onda de la radiación incidente, del ángulo de medida y de la forma, características ópticas y distribución granulométrica de las partículas suspendidas en el agua.

En medidas de la atenuación de la radiación transmitida, el valor medido depende del ángulo de apertura Ω_0 de la eficiencia luminosa que llega al receptor.

Cuando se mide la radiación difusa, los valores medidos dependen del ángulo θ y del ángulo de apertura Ω_0 . El ángulo θ es el formado entre la dirección de la radiación incidente y la dirección de la radiación difusa medida.

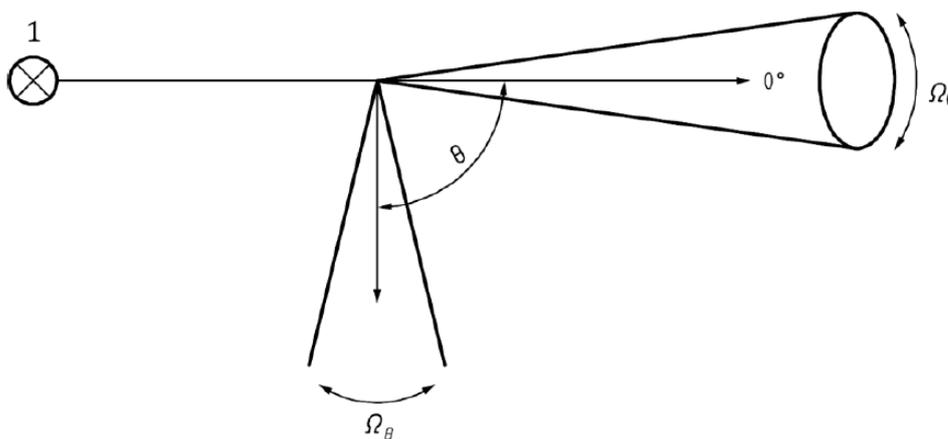


Figura 2.2 Croquis explicativo de los ángulos que condicionarán las mediciones.

La aplicación a la medida de la concentración de las sustancias no disueltas solamente sería posible cuando los parámetros anteriormente citados fueran conocidos. Generalmente no se dispone de esta información y, en consecuencia, no se puede calcular la concentración másica de las partículas en suspensión a partir del valor de la turbidez.

2.5.1.3 - Método de medida de la radiación difusa (nefelometría)

El nefelómetro deberá cumplir los siguientes requerimientos:

- A) La longitud de onda espectral deberá tener un rango de 830nm a 890nm.
- B) No debe existir divergencia en el paralelismo de la radiación incidente y, cualquier convergencia debe ser inferior a $1,5^\circ$.
- C) ángulo de medida, θ , debe ser de $90^\circ \pm 2,5$.
- D) el ángulo de apertura, Ω_0 entre 20° y 30° en la muestra de agua.

A la hora de realizar el calibrado se deberá seguir las instrucciones del fabricante de los patrones obtenidos. Se debe tener en cuenta que se ha de tener especial cuidado con ellas a causa del sulfato de hidracina $N_2H_6SO_4$, el cual es tóxico y puede ser carcinógeno.

Para obtener los valores de turbidez se deberán adquirir a partir de la curva de calibrado construida o directamente de la escala de medida del equipo, en caso de que ese haya comprobado que dicha escala está correctamente calibrada.

Al tomar las mediciones se debe tener en cuenta que las burbujas provocan interferencias en las muestras con baja turbidez y deben ser minimizadas, por lo que se recomienda no agitar el bote en ningún caso.

Los resultados se expresan, en unidades nefelométricas de formacina, de la siguiente forma:

- Si la turbidez es < 1 FNU, con una precisión de 0,01 FNU;
- Si la turbidez es $> 1,0$ FNU y < 10 FNU, con una precisión de 0,1 FNU;
- Si la turbidez es > 10 FNU y < 400 FNU, con una precisión de 1 FNU.

Por último, el informe de ensayo debe incluir como mínimo la siguiente información:

- El método de ensayo utilizado, junto con una referencia a esta parte de la Norma ISO 7027, es decir Norma ISO 7027-1:2016.
- El resultado, expresado conforme al apartado 5.3.4.
- Cualquier detalle o circunstancia que pudiera haber influido sobre los resultados.

La turbidez se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez o NTU. Estos sensores, también llamados nefelómetros, son capaces de determinar la cantidad de partículas en suspensión al medir la intensidad de luz que es dispersada.

Al realizar el estudio de los nefelómetros que existen en el mercado se ha podido observar que todos los sensores alcanzaban un alto precio, superiores a los 300€. Estos equipos de alta fiabilidad se salen del presupuesto previsto para un analizador de bajo coste, por lo que se ha decidido prescindir de los comerciales y optar por un turbidímetro diseñado desde cero, partiendo de las investigaciones realizadas en otros proyectos, los cuales se han expuesto en el apartado anterior “1.3 -Antecedentes”.

2.5.1.4 - Descripción de alternativas

Para comparar las características del turbidímetro diseñado respecto de uno comercial, a continuación, se describirán las especificaciones de un turbidímetro comercial, como las obtenidas del turbidímetro que se ha utilizado finalmente.

2.5.1.4.1 PCE-TUM 20L

Estudio de las características:

- Dos rangos de medición para una mayor precisión: [0,00-50,00] NTU y de [50,00-1000,00].
- Tiempo de respuesta de 1 minuto.
- Precisión de $\pm 0,5$ NTU.
- Precio: 335,95€. Entre los turbidímetros comerciales uno de los precios más bajos encontrados.

2.5.1.4.2 Turbidímetro Open-Source

Estudio de características tras las pruebas realizadas en un corto plazo son las siguientes:

- Coste: 63,46€
- Diseño simple, fácil de implementar, modificar y fabricar.
- Alta precisión para NTU altos, pero comienza a perder precisión cuantas menos partículas haya en suspensión, es decir, para muestras con NTU bajos la precisión se ve altamente afectada. Rango comprendido entre 30 a 500NTU.
- Respuesta inmediata.
- Alta reproducibilidad.

2.5.1.5 - Análisis de las alternativas

Para seleccionar el tipo de nefelómetro más adecuado, se tendrán en cuenta especialmente los siguientes factores: Precio, resistencia, precisión y facilidad de implementación.

En las siguientes líneas, se definen los criterios usados para puntuar la tabla 2.2.

- Factor económico: Se le asigna un peso del 60% siendo el factor más importante que limite el encarecimiento del coste global del proyecto. Siendo el factor por el que directamente se ha optado por un turbidímetro no comercial al tratarse de unos dispositivos con precios tan elevados.
- Precisión: Se le ha asignado un peso del 20%, al ser importante para determinar con precisión la calidad del agua a analizar, siendo la turbidez una de las medidas más importantes para determinar la calidad del agua. Por otra parte, la precisión a bajos NTUs a pesar de ser de gran importancia se tiene que tener en cuenta que el objetivo del analizador es la reutilización del agua para uso agrícola, en ningún caso para el consumo humano de la misma. Ya que según la OMS el agua para consumo humano debe presentar unos NTUs inferiores a 5 NTUs, aunque esto puede variar en función de las circunstancias locales. [20]
- Resistencia: Se le ha asignado un 20% para aumentar la vida útil del sensor. En este aspecto no se han podido hacer pruebas en un largo periodo de tiempo, por lo que se desconocen actualmente la vida útil de turbidímetro fabricado.

- **Facilidad de implementación:** Se le asigna un peso del 5%, al ser un criterio a tener en cuenta, pero donde los dos estudiados presentan una buena puntuación en este ámbito uno al ser comercial y el otro gracias a su simpleza.

Tabla 2.3 Análisis de alternativas de Turbidímetros

	PCE-TUM 20L	Nuevo Turbidímetro
Precio 60%	1	2
Resistencia 20%	2	1
Precisión 15%	2	1
Facilidad de implementación %5	2	1
	1,4	1,6

2.6 - Parte 4: Microcontrolador

Para la recepción de las señales generadas por los sensores anteriormente mencionados, el tratamiento de estos, y el envío de los datos para su posterior visualización en el display, como, en la plataforma de “Internet of Things”, es necesario proveer al sistema de un microcontrolador.

Los microcontroladores son circuitos integrados programables, capaces de ejecutar funciones grabadas en su memoria. Todos ellos incluyen tres principales unidades, la unidad central de procesamiento, la memoria y los periféricos de entrada y salida. El carácter programable de estos, simplifica el diseño de los circuitos electrónicos y permite una mayor flexibilidad y modularidad del mismo circuito.

Por esta razón, se ha realizado un estudio de los microcontroladores que existen en el mercado y se han estudiado las siguientes tres alternativas en profundidad.

2.6.1.1 - Descripción de alternativas

2.6.1.1.1 PIC24 + Explorer 16

Este micro presenta una alta capacidad de procesamiento, con diferentes osciladores de alta precisión y está dotado de un microprocesador de 16 bits. Se ha estudiado en especial este microcontrolador al haber trabajado con él en anteriores ocasiones, por lo que se

conocen tanto sus limitaciones como sus grandes cualidades. Finalmente, su alto precio, en comparación con los siguientes micros presentados, ha llevado a descartar esta opción.

Estudio de las características:

- 100 pines I/O.
- Lenguaje de programación: C.
- ICD 3 para la depuración.
- Pantalla LCD integrada.
- Potenciómetro integrado.
- Leds integrados.
- Pulsadores integrados.
- Comunicaciones: 2 puertos SPI, 2 I2C y un PMP.
- Precio: 83,42€, PIC24 y la Explorer 16 junto a los 104,70€, del ICD 3, hacen un total de 188,12€.



Figura 2.3 PIC24 con la Explorer 16

2.6.1.1.2 Arduino Uno

Arduino ATmega328 presenta un microcontrolador de 8 bits, con una velocidad de oscilación de 10MHz. Se ha decidido optar por los microcontroladores de la compañía Arduino al ser una compañía de desarrollo de software y hardware libres, así como con una comunidad internacional donde se pueden encontrar proyectos de todo tipo y amplias opciones a bajo precio. Por lo tanto, comparte la misma filosofía con la que se está realizando este proyecto, como se expone en los objetivos del mismo en el apartado “1.1.1 -Objetivos y alcance”.

Estudio de las características:

- 14 pines digitales y 6 pines analógicos.
- Lenguaje de programación: Propio de Arduino basado en C y C++. Amplias librerías creadas por la comunidad y por los fabricantes de los dispositivos compatibles con Arduino.
- Gran variedad de sensores compatibles con Arduino.
- No dispone de depuración.
- Comunicaciones: SPI, I2C y UART.
- Precio: 26,17€.



Figura 2.4 Arduino UNO

2.6.1.1.3 Arduino Mega

Siguiendo con la misma filosofía que con el anterior micro presentado, se ha acabado optando por esta alternativa, al necesitar aumentar el número de entradas y salidas que permite.

Estudio de las características:

- 70 pines I/O. 54 pines digitales y 16 pines analógicos.
- Lenguaje de programación: Propio de Arduino basado en C y C++. Amplias librerías creadas por la comunidad y por los fabricantes de los dispositivos compatibles con Arduino.
- Gran variedad de sensores compatibles con Arduino.
- No dispone de depuración.
- Comunicaciones: SPI, I2C y UART.
- Precio: 35,00€.

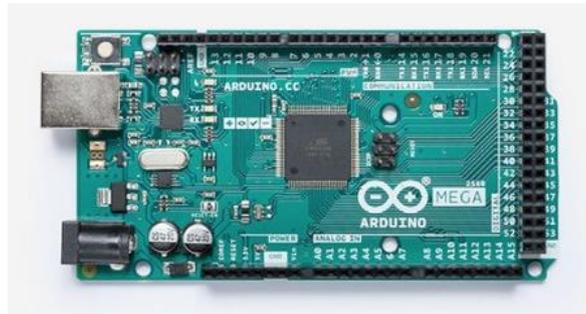


Figura 2.5 Arduino Mega

2.6.1.2 - Análisis de las alternativas

Para seleccionar el tipo de microcontrolador más adecuado, se tendrán en cuenta especialmente los siguientes factores: Precio, número de pines, potencia de procesamiento y facilidad de implementación.

En las siguientes líneas, se definen los criterios usados para puntuar la tabla 2.3.

- Factor económico: Se le asigna un peso del 40% siendo el factor más importante que limite el encarecimiento del coste global del proyecto.
- Número de pines: Se le ha asignado un peso del 30%, al ser necesarios para conectar los distintos módulos.
- Potencia de procesamiento: Se le ha asignado un 20% al no ser especialmente necesario la rapidez de las mediciones, pero si se vuelve imprescindible a la hora de enviar o recibir datos desde el servidor.
- Facilidad de implementación: Se le asigna un peso del 10%, al ser un criterio a tener en cuenta, donde el respaldo de la comunidad y la amplia variedad de sensores en el mercado lo convierten en un factor a tener en cuenta.

Tabla 2.4 Análisis de alternativas de Microcontroladores

	PIC24	Uno	Mega
Precio 40%	1	3	2
Número de pines 30%	3	1	2
Potencia de procesamiento 20%	3	1	2
Facilidad de implementación %10	1	2	3
	2	1,9	2,1

2.7 - Parte 5: Comunicaciones

La tecnología Internet of Things o el internet de las cosas, dota a objetos cotidianos con una interconexión digital con internet. Esta funcionalidad aporta la opción de realizar mediciones en distintas condiciones, como distinto clima a la que se somete a las biojardineras, distinta tierra o incluso obtener parámetros teniendo en cuenta distintos tipos de aguas grises, permitiendo de esta forma realizar un macro estudio en el futuro para determinar en entorno más adecuado o la viabilidad en el tiempo de este tipo de tratamiento de aguas grises.

Para esta interconexión es necesario disponer de acceso a internet. Para ello se han estudiado diferentes alternativas, teniendo en cuenta que no se quiere contratar un servidor que haya que mantener en el tiempo, generando unos costes adicionales al sistema.

Se utilizará una plataforma donde poder visualizar y descargar los datos obtenidos para poder almacenarlos. La plataforma utilizada se ha tenido en cuenta que esta pueda ser usada con una red de sensores, donde todos ellos puedan conectarse a la misma para centralizar los datos, siempre pudiendo diferenciarlos. Será imprescindible que se puedan separar los datos de cada sistema, ya que cada uno de ellos podría provenir de distintas condiciones.

Para poder conectar el sistema a internet se han estudiado diferentes módulos.

2.7.1.1 - Descripción de alternativas

Se han estudiado 3 diferentes vías de comunicación, WiFi, Ethernet y GSM y se presenta una alternativa para cada una de ellas.

2.7.1.1.1 ESP8266

Este microprocesador de bajo coste, dota al sistema de una comunicación WiFi. La versión más sencilla de este microprocesador, el ESP01, consta de un procesador de 32bits a 80MHz, con 512kB o 1MB de memoria según el modelo. Está compuesto por 2 pines GPIO, SPI, I2C y UART.

Respecto a la comunicación Wifi, tiene integrada 802.11 b/g/n, incluidos modos WiFi Direct (P2P) y Solf-Ap. Incluye una pila TCP/IP completa lo que resta trabajo al procesador. Se ha de tener en cuenta que el procesador del Arduino puede verse sobrepasado por la cantidad de datos que envía y recibe de Internet. [21]

Estudio de las características:

- Precio: 6,49€
- Se ha de permanecer a una distancia media, aproximadamente 25 metros, del router para tener una conexión Wifi estable.

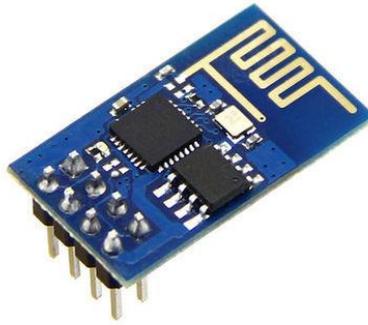


Figura 2.6 ESP8266 ESP01 [22]

2.7.1.1.2 Ethernet Shield W5100

Este controlador dota al sistema de comunicación Ethernet, al conectarlo al router o switch. De forma sencilla se consigue configurar la comunicación y enviar y recibir los datos del servidor. Para la conexión entre el modulo ethernet y el router o switch será necesario disponer de un cable RJ45.

Estudio de las características:

- Precio: 12,19€.
- Se ha de tener acceso al router o switch.
- Leds integrados.
- Shield para Arduino Mega, lo que facilita las conexiones.



Figura 2.7 Ethernet Shield W5100

2.7.1.1.3 GSM SIM800L

Este módulo compacto es capaz de proveer al Arduino de comunicaciones de tipo GSM utilizadas en los teléfonos móviles. Para ello es necesario incluir una tarjeta SIM al módulo para poder enviar y recibir datos.

Este módulo ofrece grandes prestaciones como enviar y recibir llamadas o SMS, incluso conectarse a la red utilizando los datos de la Sim.

Se debe de tener en cuenta que cada SMS, llamada o consumo de datos conlleva un coste dependiendo del contrato con la que se haya adquirido la tarjeta SIM.

Inicialmente se optó por esta opción al desconocer si se dispondría de una conexión a internet lo suficientemente estable como para el envío de datos al servidor. Pero debido a los costes tras cada comunicación se ha decidido desestimar esta alternativa.

Estudio de las características:

- Precio: 11,99€.
- No es necesario tener acceso a una red Wifi.
- Leds integrados.
- Es necesario conectarle una antena dependiendo del terreno y la intensidad de la señal que reciba en el momento de la comunicación.
- Tamaño muy reducido.



Figura 2.8 SIM 800L [23]

2.7.1.2 - Análisis de las alternativas

Para seleccionar la forma de comunicación más adecuada, se tendrán en cuenta especialmente los siguientes factores: Facilidad de implementación, precio y la distancia al router. En las siguientes líneas, se definen los criterios usados para puntuar la tabla 2.4.

- **Facilidad de implementación:** Se le asigna un peso del 60%, al ser un factor vital para no acarrear problemas con el servidor que puedan entorpecer la visualización de los datos.
- **Factor económico:** Se le asigna un peso del 20% siendo un factor importante como en el resto de los casos, pero se ha disminuido su peso al tener las tres opciones precios muy similares. A la hora de puntuar se tendrá en consideración los sobrecostes que lleva cada envío de dato en el módulo SIM8001 más el coste de una tarjeta SIM estimado en 15€.
- **Distancia con el router:** Se le ha asignado un peso del 20%, al tener cada una de las opciones diferentes características en este ámbito.

Tabla 2.5 Análisis de alternativas de módulos de comunicación

	ESP8266	W5100	SIM800L
Facilidad de implementación 60%	2	3	1
Precio 20%	3	2	1
Distancia Router 20%	2	1	3
	2,2	2,4	1,4

3 - DISEÑO E IMPLMENTACIÓN

En los siguientes apartados se mostrarán los esquemas que se han utilizado para el acondicionamiento de cada sensor. Para ello se ha dividido siguiendo las mismas partes mencionadas en el capítulo “2.1 Descripción General”, donde se expone el desarrollo de cada sensor en dos partes.

- Hardware: Circuito acondicionador diseñados para adaptar la señal de entrada al microcontrolador.
- Software: Código utilizado para el control de los sensores, la recogida de datos y su posterior envío.

3.1 - Termómetro

Como se explicó en el apartado “2.3-Parte 1: Termómetro”, tras analizar los diferentes sensores de temperatura del mercado, se optó por utilizar un sensor RTD. Las PT100 son dentro del tipo RTD los más utilizados, por su precio y por las características que presenta. Como se mencionó anteriormente los RTD son tipos de sensores que varían la resistencia entre sus terminales en función de la temperatura a la que se someta al sensor.

Una de las características principales de este tipo son su robustez, lo que ha llevado a estos sensores a ser los más usados en entornos industriales, teniendo una durabilidad alta. La linealidad, que implica que su función de transferencia sea una recta prácticamente perfecta, como se puede apreciar en la curva de calibración de la PT100.

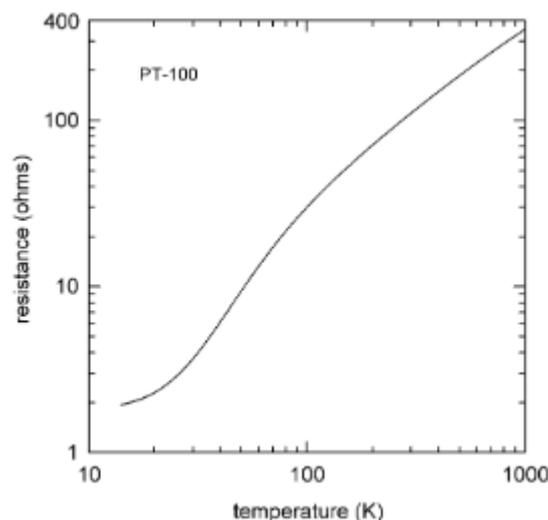


Figura 3.1 Curva de calibración PT100. [24]

En comparación con las NTC la variación de la temperatura y la resistencia de salida presenta una curva exponencial, lo que dificulta el cálculo preciso de la temperatura.

Para el cálculo de la temperatura de un PT100 se utilizará la siguiente ecuación que relaciona la temperatura que mide con la resistencia en sus terminales:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (3.1)$$

Donde:

R_0 : La resistencia de la PT100 a 0°C , que es de 100Ω .

α : Constante que depende de cada PT100.

ΔT : Valor de la temperatura. Se calcula de la diferencia de la temperatura medida y 0°C .

Al tratarse de un sensor resistivo, como circuito acondicionador se podría utilizar un circuito potenciométrico, pero al ser un transductor de pequeña señal, implica que una variación de la temperatura provoca una variación muy pequeña en la resistencia de salida. Por tanto, un simple divisor de tensión para medir la variación de tensión presenta problemas que pueden evitarse usando un “Puente de Wheatstone”.

Este circuito está formado por dos divisores de tensión. En la que encontramos una rama con una resistencia fija y la PT100, y en la segunda dos resistencias fijas. El objetivo es calcular la diferencia de tensión entre ambas ramas.

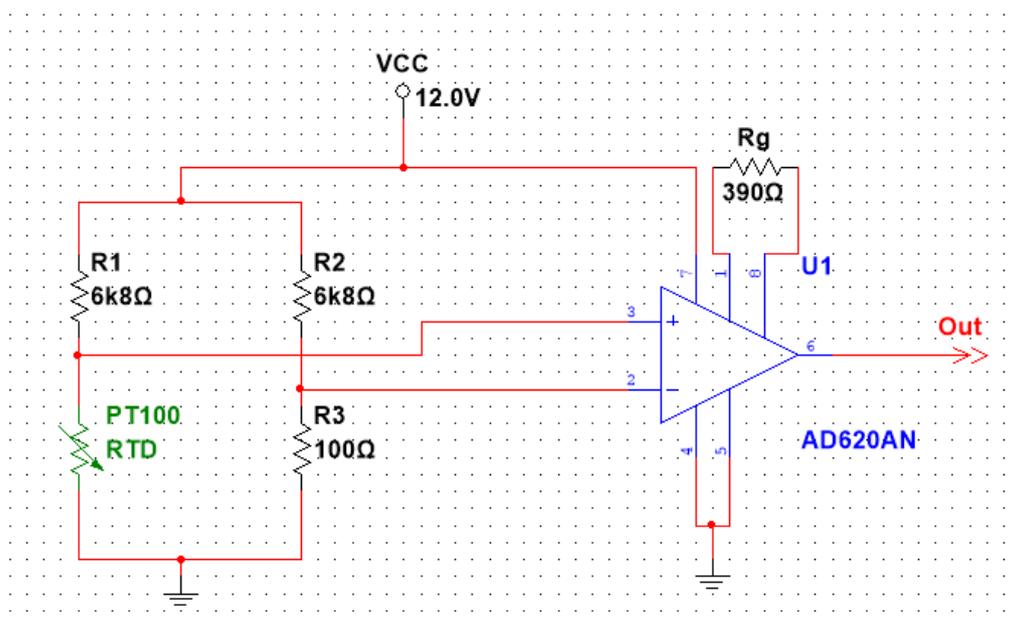


Figura 3.2 Circuito termómetro realizado en Multisim.

El objetivo del Puente de Wheatstone en comparación con una única rama que utiliza el divisor de tensión es poder eliminar la componente constante y obtener a la salida solo la parte del voltaje consecuencia de la temperatura. Se ha diseñado para medir temperaturas superiores a 0°C , debido a que únicamente se pretende determinar la validez del resto de medidas.

Por tanto, a 0°C la resistencia en ambas ramas debe ser la misma. Las dos resistencias superiores R1 y R2 son iguales y la resistencia 4 por dicho motivo deberá ser la resistencia que presenta un PT100 a 0°C , es decir, 100Ω . Para fijar el valor de R1 y R2 se debe elegir

un valor lo suficientemente alto como para reducir la corriente que circula por el puente, pero sin que caiga toda la tensión en ellas.

Como se ha comentado anteriormente, la señal es muy pequeña, por lo que debe ser amplificada. Para este cometido se utilizará el amplificador AD620. Se alimentará con +12V la positiva y con -12V la negativa, al ser tensiones fáciles de conseguir y entra dentro de lo soportado por el integrado como se indica en el datasheet.

Parameter	Rating
Supply Voltage	±18 V
Internal Power Dissipation ¹	650 mW
Input Voltage (Common-Mode)	±V _S
Differential Input Voltage	25 V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range (Q)	-65°C to +150°C
Storage Temperature Range (N, R)	-65°C to +125°C
Operating Temperature Range	
AD620 (A, B)	-40°C to +85°C
AD620 (S)	-55°C to +125°C
Lead Temperature Range (Soldering 10 seconds)	300°C

Figura 3.3 Índices absolutos máximos. [25]

A continuación, se debe conectar la rama del PT100 a la entrada +IN del amplificador y la otra rama a la entrada -IN.

Por último, para calcular la resistencia que configura la ganancia del amplificador obtenemos la relación de la hoja del fabricante:

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G-1}$$

Figura 3.4 Configuración de la ganancia mediante la resistencia R_G. [25]

Para fijar la ganancia en la que queremos trabajar fijaremos el rango entre 0°C y 40°C y que la salida del amplificador vaya entre 0V a 5V. Por tanto:

$$G = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \quad (3.2)$$

A 40°C la tensión en el divisor del PT100 será de 0.208V y en la otra rama será de 0.173V. Sustituyendo obtenemos el valor de la ganancia:

$$G = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = \frac{5V-0V}{0.208V-0.173V} = 142.48 \quad (3.3)$$

Recuperando la ecuación anterior una vez obtenida la ganancia calculamos el valor de la resistencia.

$$R = \frac{49.4k\Omega}{G-1} = \frac{49.4k\Omega}{142.48-1} = 355.4\Omega \quad (3.4)$$

Se ha obtenido una resistencia que se acerque lo máximo posible a ese valor, siendo este siempre mayor que el obtenido en los cálculos. Una vez obtenida la resistencia real que se utilizará se recalcula la ganancia real que se obtendrá.

La resistencia que se utilizará será de 390Ω , por lo tanto, repitiendo los cálculos anteriores obtenemos que la ganancia real será de, $G = 127.66$.

Por último, para calcular la temperatura de la PT100 se debe deshacer el efecto amplificador.

$$V_{amp} = \frac{V_{adc}}{G} \quad (3.5)$$

El segundo paso será deshacer el efecto del puente, para conocer la tensión de la rama donde se encuentra el sensor de temperatura para lo cual debemos, sumar la tensión de entrada del amplificador con la tensión constante de la rama donde no se encuentra el PT100.

$$V_A = V_{amp} + V_B \quad (3.6)$$

Para conocer la resistencia entre los terminales de la PT100 se despeja de la ecuación del divisor de tensión.

$$V_A = V_{cc} \frac{R_{PT100}}{R_{PT100} + R_1} \quad (3.7)$$

Una vez obtenido el valor de la resistencia del sensor, para calcular la temperatura se recupera la formula X mencionada al principio de este apartado.

$$R_{PT100} = R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (3.8)$$

Despejando:

$$T = \frac{\frac{R_{PT100}}{R_0} - 1}{\alpha} + T_0 \quad (3.9)$$

De realizar todos estos cálculos se encarga el microcontrolador, como se muestra en las siguientes líneas de código.

Para una mejor comprensión del siguiente software se presenta el diagrama de flujo que sigue este apartado del programa. Cabe mencionar que los aspectos de navegación por

los menús o aspectos gráficos han sido excluidos de la explicación para no entorpecer la lectura del código.

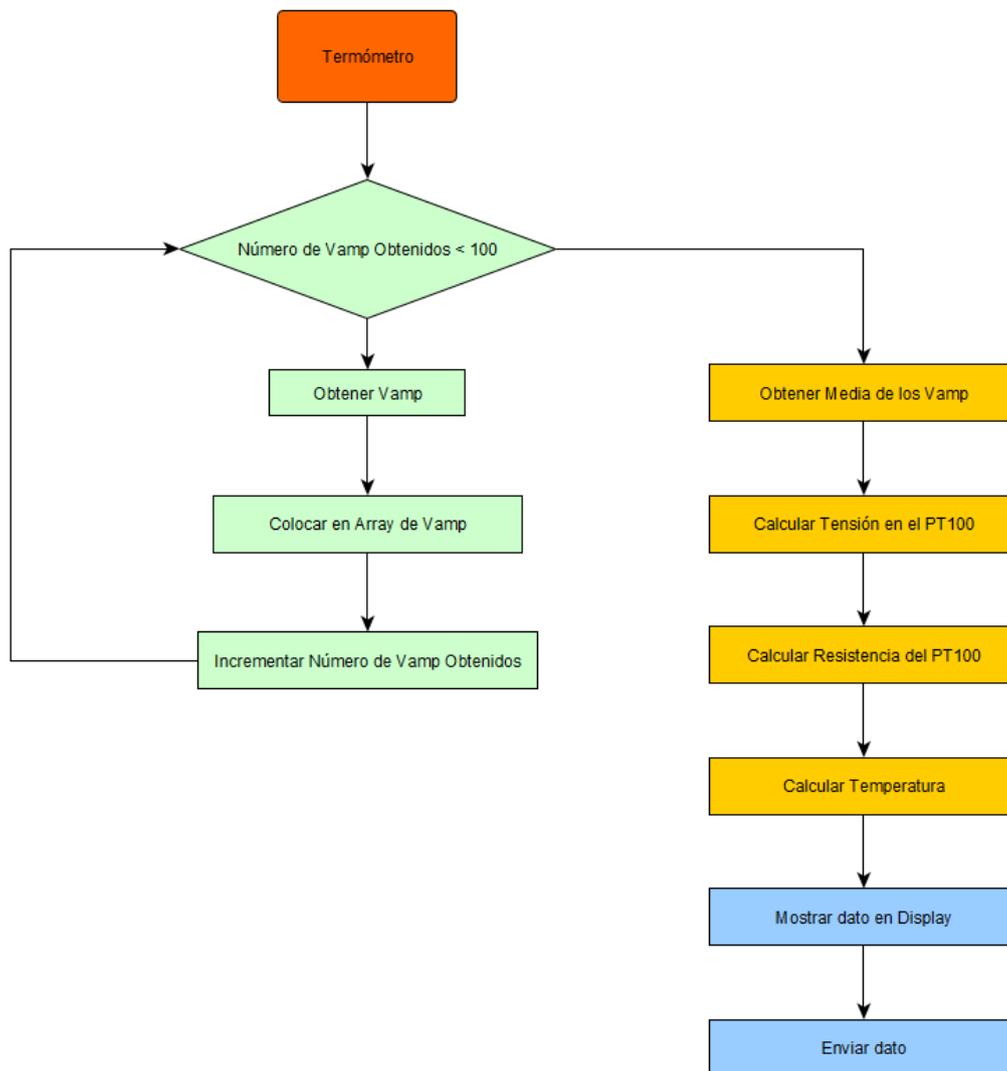


Figura 3.5 Diagrama de flujo. Termómetro.

Se han utilizado diferentes colores para separar en 4 secciones el código. En la primera de todas, indica el comienzo o la llamada a esta función, que se activará al ser seleccionada por el usuario utilizado los botones que se encuentran junto al display.

En color verde, encontramos la sección que se encarga del almacenamiento de los datos en un array, capaz de almacenar 100 datos. Una vez obtenidos, pasamos la sección donde se realizan los cálculos matemáticos. En primer lugar, obtendremos el valor medio de las 100 muestras obtenidas. Posteriormente realizaremos los cálculos que se muestran en las ecuaciones de la 3.5 a la 3.9 obteniendo de esta forma la temperatura de la muestra.

Finalmente, la sección en azul se encarga de mostrar el dato al usuario mediante el display y el envío de datos a la plataforma de Internet of Things. Para este último apartado se

dedica todo un capítulo “0 Comunicaciones” al ser de gran magnitud y común para todos los parámetros.

A continuación, se presenta parte del código utilizada para el control del sensor y el posterior tratamiento de los datos.

```

348 /*****
349 float funcionMuestraTemperatura_A(float pendiente, float n)
350 {
351     float ArrayVamp[100], dato = 0.0, aux = 0.0;
352     int i;
353     float g = 129.36, Vb = 164.2, Rs = 6710, Vcc = 11.23, alpha = 0.005;
354     char sensorPrintout[4];
355     //Cabecera
    
```

Figura 3.6 Código sensor temperatura. Parte 1 de 3.

En esta primera parte la función se declaran las variables necesarias para los cálculos que se realizarán en las siguientes líneas, entre estos se encuentran los datos que se han obtenido de los cálculos que se han realizado anteriormente.

```

365     //Obtener datos
366     for( i=0 ; i<100 ; i++)
367     {
368         dato = analogRead(ANALOG_TEMPERATURA);
369         ArrayVamp[i] = dato;
370         delay(10);
371     }
372     //Calcular valor
373     for( i=0 ; i<100 ; i++)
374     {
375         aux = aux + ArrayVamp[i];
376     }
377     dato = aux / 100; // Calculo de la media
378
379     dato = ((dato * 5) / 1024); //Conversión
380     dato = ((dato * 1000) / g) + Vb; // Ecuaciones 3.5 y 3.6 para calcular Va
381     dato = Rs / (( Vcc / (dato / 1000)) - 1); //Ecuación 3.8 para calcular R(PT100)
382     aux = (( dato / 100) - 1) / alpha; //Ecuación 3.9 para calcular la Temperatura
383
    
```

Figura 3.7 Código sensor temperatura. Parte 2 de 3.

En esta segunda parte se encuentra las secciones verdes y amarillas encargadas de la obtención de la entrada analógica y la obtención de la temperatura.

```

384     //Mostrar valor
385     tft.setCursor(16, 50);
386     tft.setTextColor(WHITE);
387     tft.setTextSize(2); //Tamaño del texto
388     String stringTemperatura = String(aux);
389     stringTemperatura.toCharArray(sensorPrintout,4);
390     delay(500);
391
392 }
393 /*****
    
```

Figura 3.8 Código sensor temperatura. Parte 3 de 3.

Finalmente, en esta última parte se convierte el dato y se imprime en el display, manteniéndolo durante 500 milisegundos. Al finalizar, se regresa automáticamente al menú anterior, dando la opción a realizar el resto de pruebas o a repetir cuantas veces se quiera esta.

3.2 - pH-metro

En este apartado, se explicará cómo realizar las conexiones de los componentes que se han adquirido, al Arduino Mega y posteriormente se comentara el código usado para la recepción, tratamiento y visualización de los datos obtenidos por el pH-metro.

La sonda consta de un conector de tipo BNC que se ha de conectar al circuito acondicionador del mismo fabricante. En este, tendremos 6 pines, de los cuales únicamente deberemos conectar tres de ellos.

Los pines que deberemos conectar al Arduino Mega son los dos pines para la alimentación Vcc y Gnd, y por ultimo Po. De este último recibiremos la señal analógica que deberemos tratar para obtener, dependiendo de la curva de calibración, el valor de pH.

De las hojas del fabricante obtenemos los siguientes datos para fijar la curva de calibración a 25°C.

VOLTAGE (mV)	pH value	VOLTAGE (mV)	pH value
414.12	0.00	-414.12	14.00
354.96	1.00	-354.96	13.00
295.80	2.00	-295.80	12.00
236.64	3.00	-236.64	11.00
177.48	4.00	-177.48	10.00
118.32	5.00	-118.32	9.00
59.16	6.00	-59.16	8.00
0.00	7.00	0.00	7.00

Figura 3.9 Características del pH-metro a 25°C. [26]

Una vez explicadas las conexiones antes de pasar con la programación se deben tener las siguientes precauciones para utilizar el sensor correctamente.

En primer lugar, antes y después de utilizarlo se deberá limpiar la punta del electrodo sumergiéndolo en agua pura. Para conservarlo correctamente debe mantenerse la punta sumergida en la solución 3N K CL, solución que se incluye junto con la sonda.

Finalmente, se debe tener en cuenta que únicamente la punta de la sonda es sumergible, en comparación con otros pH-metros del mercado más caros. Según la hoja del fabricante se estima la durabilidad del sensor en 6 meses con agua pura a 25°C, realizando pruebas continuadas en el tiempo. Mientras que en agua acida o alcalina a 25°C, baja la durabilidad a únicamente 1 mes, lo que puede justificar la compra de los pH-metros más caros, en el caso de que vayan a ser usados de forma continuada.

El pH-metro puede ser alimentado directamente del Arduino con 5V.

Antes de comenzar con el código se debe tener en cuenta que el tiempo de respuesta varía dependiendo del valor de pH de la disolución. Cuando más cerca este de la solución neutra (pH = 7.00), más tardará. Variando el tiempo de respuesta de entre 6 minutos para valores de pH = 6, hasta únicamente 10 segundos para valores de pH = 10. Por lo tanto, se ha esperado siempre 8 minutos para empezar a recopilar datos.

La temperatura ejerce cambios en las medidas tanto de pH como de turbidez. Por lo tanto, se ha optado por dotar al analizador de una sonda de temperatura que indique si las mediciones de pH y turbidez pueden realizarse. En caso de que la temperatura de la muestra permanezca entre 20°C y 30°C, se considerara que la curva de calibración de los 25°C sigue siendo apropiada para realizar las mediciones con un error aceptable para el sistema.

Para que esto no suponga un riesgo, se ha estudiado el margen de error que provoca la variación de la temperatura en la muestra a analizar.

Rango pH	Temperatura		
	0°C	25°C	60°C
Acido	pH 0.99	pH 1.00	pH 1.01
Neutro	pH 7.47	pH 7.00	pH 6.51
Básico	pH 14.94	pH 14.00	pH 13.02

Figura 3.10 Variación del pH a diferentes temperaturas. [27]

Como se puede observar en la anterior figura, el error que asumiremos aceptando un rango de $\pm 5^\circ\text{C}$ variara dependiendo del nivel de pH que presente la muestra. Las muestras más básicas serán las más afectadas, pero aceptables para el nivel de precisión exigidos para cumplir con los objetivos propuestos en este proyecto.

Por tanto, se ha calculado la ecuación de la recta partiendo de la curva de calibración presentada por el fabricante y se ha utilizado para calcular el pH de la muestra.

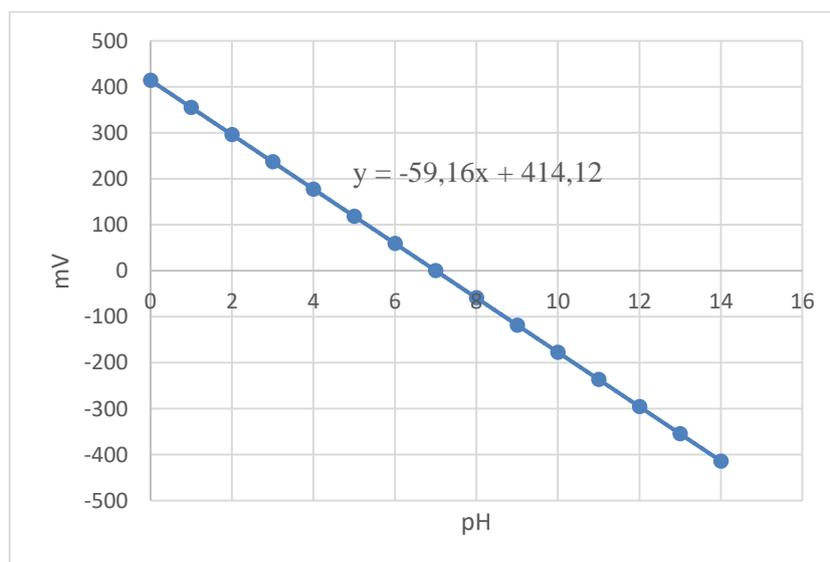


Figura 3.11 Curva de calibración del sensor de pH.

Para la correcta utilización del sensor se deberá calibrar mediante software o mediante hardware utilizando los potenciómetros situados en el circuito acondicionador. Para fijar el valor neutro de pH 7, con cero milivoltios se deberá realizar un cortocircuito juntando los extremos del conector BNC. Al hacerlo, la diferencia de tensión será 0mV, es decir, el equivalente a pH7. De esta manera, valiéndonos del potenciómetro deberemos mover el offset hasta que se encuentre en mitad del rango que es capaz de medir nuestro sensor.

Es decir, teniendo en cuenta que el máximo serán 1022, el valor medio donde se debe fijar el offset a los 0mV será 511. A continuación, se muestra el flujo diagrama de toda la función referente al pH-metro, donde se indica en gris la parte del código utilizado en la función de calibración del pH-metro.

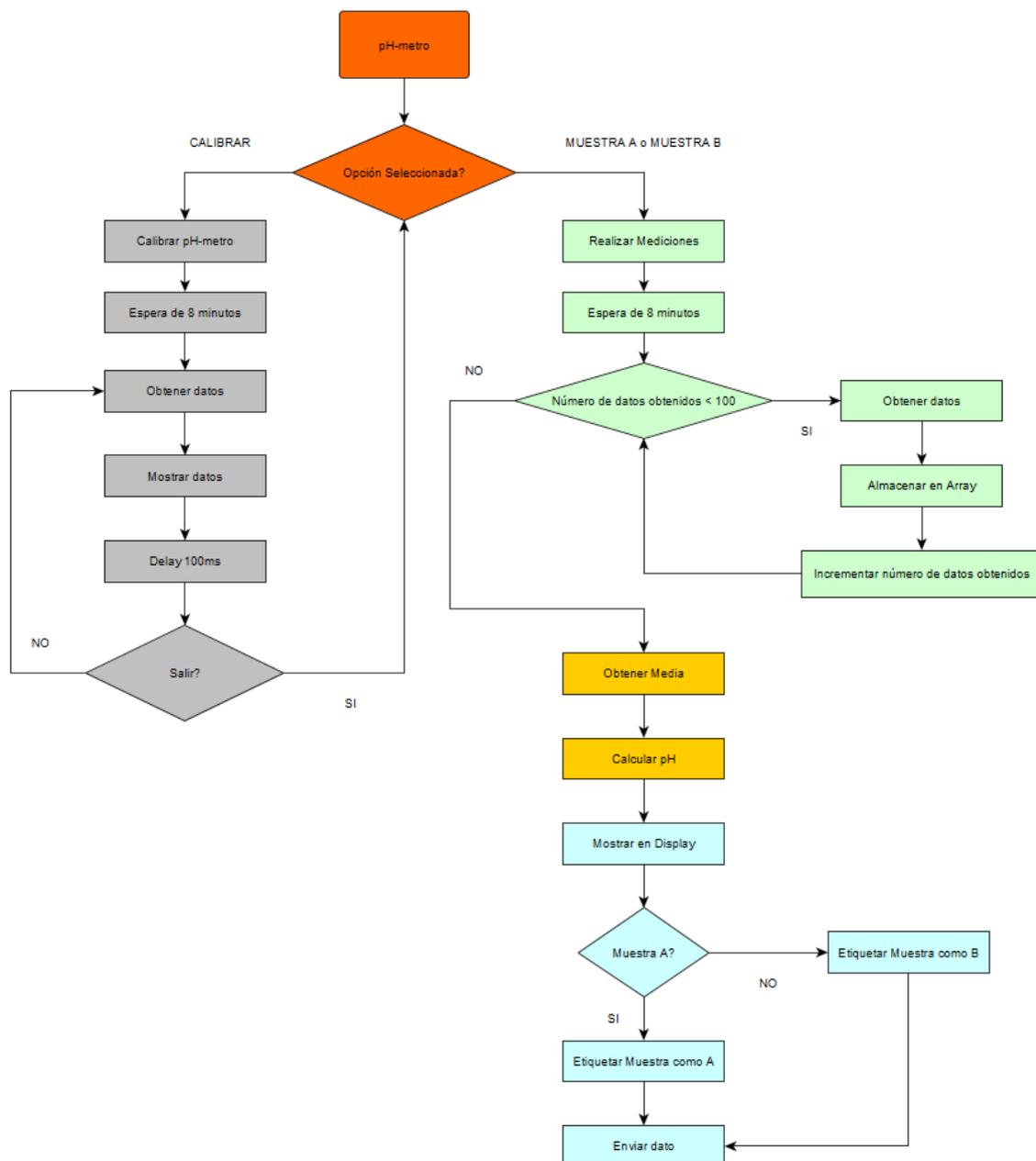


Figura 3.12 Diagrama de flujo. pH-metro.

Para calibrar el sensor se mostrará en el display la lectura del sensor analógico obtenidos por la entrada del Arduino Mega A1. De esta forma, se conseguirá fijar los 0mV a un pH7 y el sensor quedará calibrado.

El código referente a esta primera opción se muestra a continuación:

```

413 /*****
414 void funcionCalibrarPh(void)
415 {
416     //Variables
417     char char_phPatron[5];
418     int miliVolt = 0.0;
419     //Cabecera
420     tft.background(BLACK); //Limpiar pantalla
421     tft.setCursor(16, 0);
422     tft.setTextColor(BLUE);
423     tft.setTextSize(1); //Tamaño del texto
424     tft.println("CALIBRANDO 511");
425     tft.drawLine(0, 10, 128, 10, BLUE);
426     //Obtener datos
427     //delay(480000); // 8 minutos de espera
428     while( digitalRead(PULSADOR1) == LOW
429           && digitalRead(PULSADOR2) == LOW
430           && digitalRead(PULSADOR3) == LOW )
431     {
432         miliVolt=analogRead(ANALOG_PH);
433         //Mostrar valor
434         tft.setCursor(16, 50);
435         tft.setTextColor(WHITE);
436         tft.setTextSize(2); //Tamaño del texto
437         String stringpH = String(miliVolt);
438         stringpH.toCharArray(char_phPatron,5);
439         tft.println(char_phPatron);
440         delay(100);
441         //Borra valor
442         tft.setCursor(16, 50);
443         tft.setTextColor(BLACK);
444         tft.setTextSize(2); //Tamaño del texto
445         stringpH = String(miliVolt);
446         stringpH.toCharArray(char_phPatron,5);
447         tft.println(char_phPatron);
448     }
449     tft.setTextSize(1); //Tamaño del texto
450 }
  
```

Figura 3.13 Código sensor pH, función de calibración. Parte 1 de 3.

Como se puede ver en el código, mientras no se pulse uno de los pulsadores se seguirán mostrando en la pantalla el valor de los milivoltios detectados en la entrada analógica de este sensor. Se deberá variar el potenciómetro hasta tener 511 en la entrada analógica al realizar un cortocircuito.

Para obtener el valor de pH, se ha obtenido la ecuación de la curva de calibración dada por el fabricante y se ha despejado la “x”, variable que hace referencia al valor de pH, el cual queremos obtener, y se resta el offset introducido en la calibración, es decir, 511.

$$x = \frac{y - 414,12 - Offset}{-59,16} \quad (3.10)$$

```

451 /*****
452 void funcionMuestraPh_A(void)
453 {
454
455     //Variables
456     char char_phMeasure[5],char_ph[5];
457     int measure = 0, i,arrayMeasure[100],Offset=511, linea=1;
458     float totalMeasure=0.0;
459     bool atras=0;
460     //Cabecera
    
```

Figura 3.14 Código sensor de pH. Declaración de variables. Parte 2 de 5.

```

475 /*****
476     for(i=0;i<480;i++)
477     {
478         delay(1000); // 8 minutos de espera
479         tft.setCursor((i*100/480)+10, 75);
480         tft.print("|");
481         if(digitalRead(PULSADOR1) == HIGH
482            || digitalRead(PULSADOR2) == HIGH
483            || digitalRead(PULSADOR3) == HIGH)
484         {
485             i=480;
486             atras=1;
487         }
488     }
489     if(atras==0)
490     {
491         //Borrar pantalla de espera
    
```

Figura 3.15 Código sensor de pH. Estabilización. Parte 3 de 5.

En las líneas de código anterior, se procede a la espera de 8 minutos para que se establezca las lecturas del sensor. Para abandonar la medición se puede retroceder manteniendo pulsado cualquiera de los botones.

Finalmente, para que no parezca que se ha bloqueado la ejecución del programa al ser un tiempo elevado se ha incorporado una ayuda gráfica para informar al usuario de este proceso de espera.

```

501 //Obtener datos
502 for(i=1;i<=100;i++)
503 {
504     if(digitalRead(PULSADOR1) == HIGH
505        || digitalRead(PULSADOR2) == HIGH
506        || digitalRead(PULSADOR3) == HIGH)
507     {
508         i=101;
509         atras=1;
510     }
511     measure=analogRead(ANALOG_PH);
512     arrayMeasure[i]=measure;
513     totalMeasure= totalMeasure+arrayMeasure[i];
514     String stringpH = String(measure);
515     stringpH.toCharArray(char_phMeasure,5);
516     tft.print(char_phMeasure);
517     tft.print("|");
518     delay(100);
519     if(i%5==0)
520     {
521         tft.setCursor(5, 20+(linea*5*2));
522         linea++;
523         if(linea==11)
524         {
525             tft.fill(BLACK);
526             tft.stroke(BLACK);
527             tft.rect(5,20,200,200);
528             tft.setTextColor(WHITE);
529             linea=1;
530             tft.setCursor(5, 20);
531         }
532     }
533 }
534 totalMeasure = totalMeasure/101;
  
```

Figura 3.16 Código sensor de pH. Estabilización. Parte 4 de 5.

En la cuarta parte del código del pH-metro encontramos el almacenamiento de datos y la visualización de estos. Se ha decidido mostrar todos los datos que se van almacenando, como se muestra en la siguiente figura, para poder detectar problemas en el funcionamiento.



Figura 3.17 Almacenamiento y visualización de datos en display.

```

535     if(atras==0)
536     {
537         //Mostrar valor
538         //Limpiar pantalla
539         tft.fill(BLACK);
540         tft.stroke(BLACK);
541         tft.rect(5,20,200,200);
542         tft.setTextColor(WHITE);
543         tft.setCursor(20, 50);
544         tft.setTextSize(2);
545         tft.print("pH: ");
546         //Calcular valor
547         float pHValue= (totalMeasure-414.12-Offset)/(-59.16);
548         if( pHValue < 0)
549         {
550             pHValue=0.00;
551         }
552         else if(pHValue>14)
553         {
554             pHValue=14.00;
555         }
556         String stringpH = String(pHValue);
557         stringpH.toCharArray(char_ph,5);
558         tft.print(char_ph);
559         //Espera pulsación
560         while(digitalRead(PULSADOR1) == LOW
561             && digitalRead(PULSADOR2) == LOW
562             && digitalRead(PULSADOR3) == LOW);
563         //Limpiar valor
564         tft.fill(BLACK);
565         tft.stroke(BLACK);
566         tft.rect(0,20,200,200);
567         tft.setTextColor(WHITE);
568         tft.setTextSize(1);
569     }
570 }

```

Figura 3.18 Código sensor de pH. Estabilización. Parte 5 de 5.

Por último, se calcula el valor medio de todos los datos obtenidos y utilizando la ecuación 3.10 se obtiene el valor de pH. Junto a esto, se limitó en pH0 el mínimo y en pH14 el máximo. El valor de pH obtenido se mostrará, como se muestra en la siguiente figura, hasta pulsar cualquiera de los botones.



Figura 3.19 Visualización del valor de pH.

3.3 - Turbidímetro

El siguiente turbidímetro se ha diseñado para poder realizar pruebas con tres métodos. Dos de ellos se han mencionado en el informe “*An Affordable Open-Source Turbidimeter*” mencionado en “1.3 -Antecedentes”.

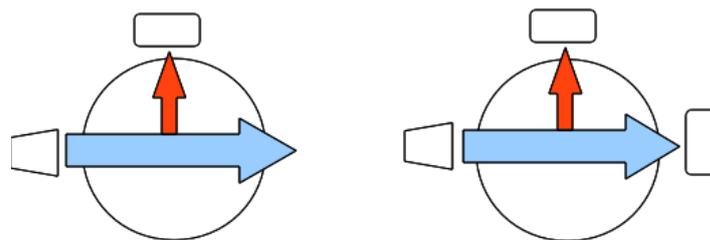


Figura 3.20 Métodos de medición nefelométricas.

Al disponer de dos receptores se han realizado mediciones con un nuevo método con la intención de ver el comportamiento del haz de luz al atravesar una partícula. Se le ha bautizado a este método como “Método Enfrentado”, al permanecer el emisor y el receptor enfrentados entre sí, como se muestra en la siguiente figura.

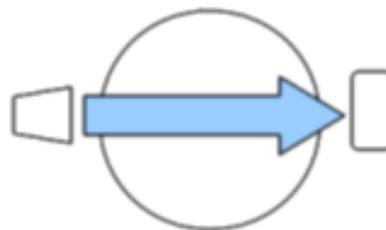


Figura 3.21 Método Enfrentados.

El objetivo es determinar el método es el más adecuado para realizar las mediciones dependiendo del nivel de turbidez a la que se encuentre la muestra. Es decir, al tener por ejemplo una muestra que presente una turbidez baja, inferior a 10NTU, por ejemplo, para poder detectar las partículas que se realice la medición con dos receptores en vez de un único receptor.

Como se explica en la siguiente figura el tamaño de la longitud de onda de la luz varía significativamente respecto al tamaño de la partícula con la que impacta dicho haz de luz.

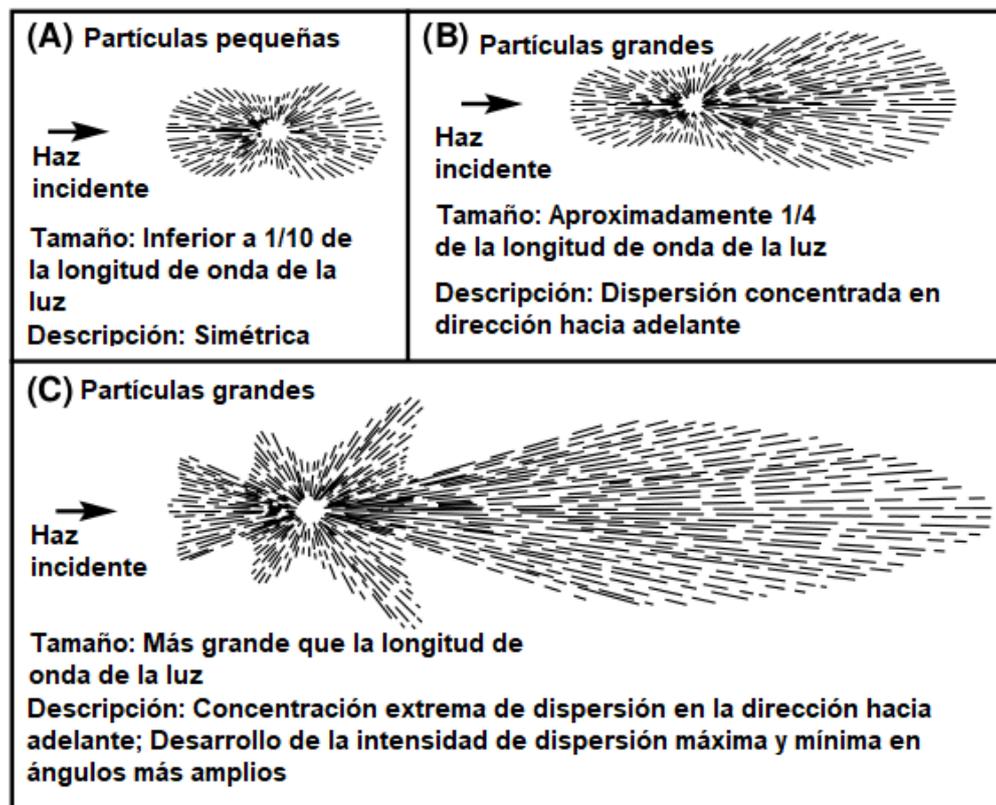


Figura 3.22 Espectro de las partículas en suspensión. [28]

El diseño del sensor de turbidez consta de dos partes:

- Hardware.
- Software.

En lo referente al diseño de hardware, tras realizar un estudio de las características de cada sensor se ha optado por adquirir como receptor el OPT101 y como emisor del haz de luz el SFH 4554.

El receptor OPT101 es un fotodiodo monolítico con un chip amplificador de transimpedancia. El voltaje de salida aumenta linealmente con la intensidad de luz recibida. A continuación, se muestra el diagrama del interior del chip junto a la configuración de los pines del mismo.

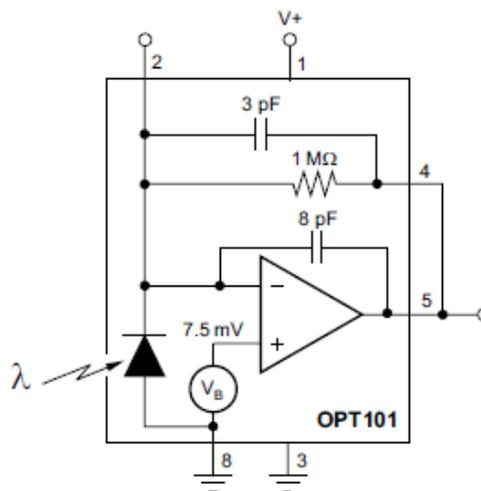


Figura 3.23 Diagrama de bloque del OPT101. [29]

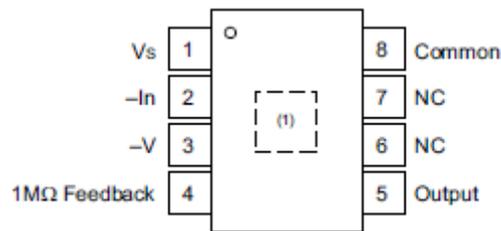


Figura 3.24 Configuración de los pins y funciones del OPT101. [29]

Para el correcto funcionamiento del sensor se ha realizado el siguiente circuito.

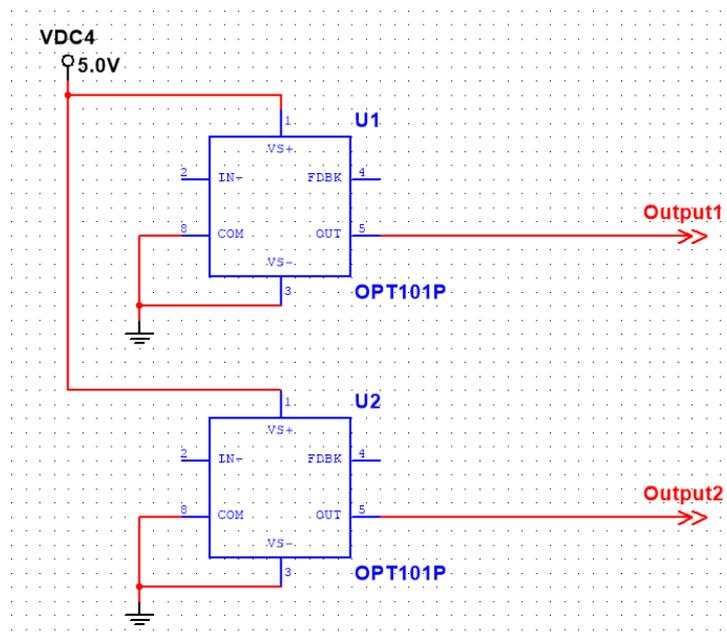


Figura 3.25 Circuito acondicionador del OPT101

Se han alimentado los sensores con 5V por el pin 1 del receptor. El pin 5 se conecta a la entrada analógica del Arduino Mega, que se especifica en el código.

A la hora de elegir el generador del haz infrarrojo se han tenido en cuenta los requerimientos mencionados en el apartado “2.5.1.3 -Método de medida de la radiación difusa”, donde entre otros, se menciona el ángulo de apertura, que debe ser de entre 20° y 30°. Según las hojas del fabricante este emisor de infrarrojos presenta un ángulo de apertura de $\pm 10^\circ$, es decir, 20°.

A su vez, en estas se indica que se debe alimentar con 100mA, por lo que para esto se ha diseñado el siguiente circuito, junto a un transistor 2N3904.

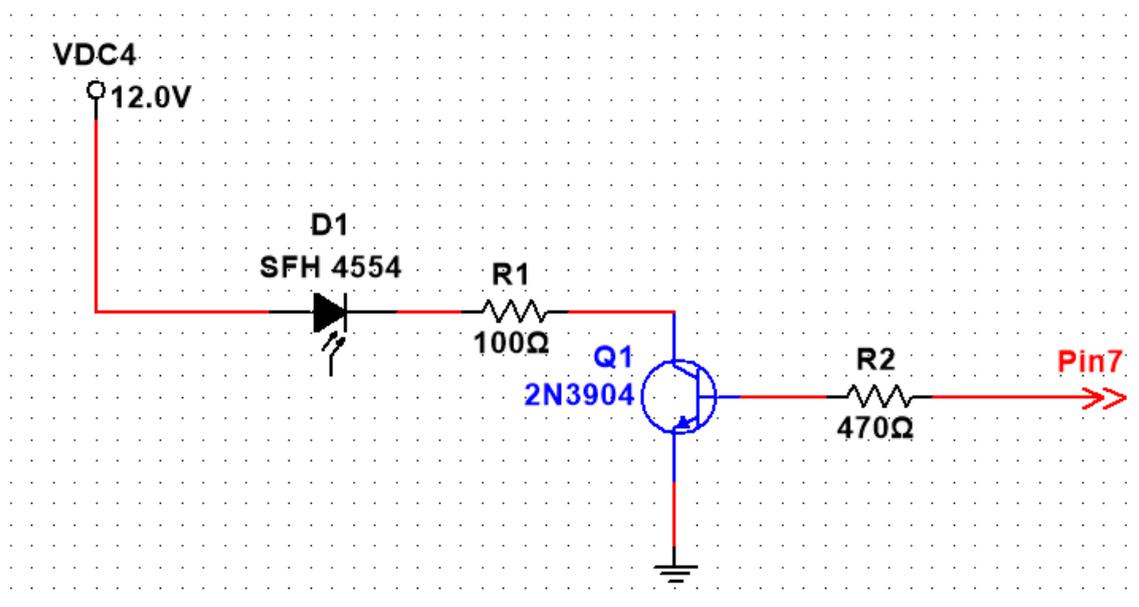


Figura 3.26 Circuito acondicionador para el emisor infrarrojo SFH4554

Para calcular el valor de las resistencias se han obtenido los siguientes datos de las hojas del fabricante del SFH 4554 y el 2N3904.

SFH 4554:

- $V_F = 1.7V$

2N3904:

- $h_{FE(\min)} = 30$
- $V_{CE(SAT)} = 0.13V$

Resolvemos la malla del colector emisor:

$$V_{CC} = V_F + R_C * I_C + V_{CE} \quad (3.11)$$

Obtenemos que la resistencia deberá ser de 100Ω para tener 100mA en el colector, que, recalculando con el valor de la resistencia obtenida, la corriente es de 101,7mA.

Calculamos la resistencia base para que entre en saturación:

$$R_B = \frac{3,3V - V_F}{\frac{I_C}{h_{FE}}} = 480\Omega \quad (3.12)$$

Por tanto, para asegurarnos que entra en saturación se ha elegido la resistencia comercial que más se acerque por debajo a este valor.

A continuación, se describe el código usado para realizar las medidas de turbidez. Se ha diseñado el código para poder realizar las mediciones usando los tres métodos. Para cambiar entre uno y otro se selecciona mediante el menú o desde la plataforma de Internet of Things. En los dos casos el algoritmo empleado es común, únicamente se ha decidido simplificar el código en el empleado para las comunicaciones para que él envié de datos se realice casi en tiempo real.

```

781  /*****
782  float medicionTurbidezEnfrentados (void)
783  {
784  //VARIABLES
785   float var_sensor = 0.01,q=0.00001,tension = 0.0, measure = 0.0,turbidez = 0.0;
786   float turbidez_anterior = 0.0,incertidumbre = 10, incertidumbre_anterior = 0.0;
787   float kalman_gain, turbidez_p, incertidumbre_p,medicion_turbidez;
788   float measure1=0.0,measure2 = 0.0,measureTotal=0.0,mediaTension=0.0;
789   float arrayMeasure[1000],mediaMeasure=0.0,mediaTurbidez=0.0;
790   double totalMeasure=0.0;
791   int i,numDatos=0;
792  //FORMATEAR ALMACENAMIENTO MEDIDAS
793   for(i=0;i<1000;i++)
794   {
795     arrayMeasure[i]=0;
796   }
797  //ACTIVAR/DESACTIVAR LED INFRARROJO
798   digitalWrite(DIGITAL_TURBIDIMETRO_1,HIGH);
799  //PANTALLA
800   lcd.setCursor(0,0);
801   lcd.print(" MEDICION");
802   lcd.setCursor(0,2);
803   lcd.print(" TURBIDEZ");
804   i=0;
805   while(digitalRead(PULSADOR2) == LOW && i<1000)
806   {
807   //OBTENER DATOS
808     measure=analogRead(ANALOG_TURBIDIMETRO_2);
809     if(measure>0)
810     {
811       arrayMeasure[i]=measure;
812       lcd.setCursor(0,1);
813       lcd.print("|");
814       lcd.print(measure,2);
815       lcd.print("|");
816       tension = measure*5/1023;
817       lcd.print("|");

```

Figura 3.27 Código medición de turbidez, método enfrentados. Parte 1 de 3.

En este primer apartado se puede ver en primer lugar la declaración de las variables que se han utilizado. Se ha aplicado el filtro de Kalman simplificado o filtro complementario para la representación en directo de las muestras obtenidas.

La pantalla donde se visualizan los datos de las mediciones en directo presenta la siguiente estructura:



Figura 3.28 Pantalla recepción de datos en directo.

La pantalla de la figura anterior se divide en dos partes. La parte de arriba corresponde a la medición que se realiza desde el sensor. Los datos mostrados, dato 1 y 2 en la figura, representan la división y la tensión obtenida respectivamente, como se observa en la línea 816 del código.

En la parte baja de la pantalla se muestran los valores referentes a la turbidez. El primer valor, el número 3 en la figura, indica el valor de la turbidez sin aplicar el filtro complementario de Kalman, y en el siguiente, el número 4 en la figura, se muestra el valor de turbidez aplicando dicho filtro.

```

819     lcd.print(tension,2);
820     lcd.print("|");
821     turbidez = 9.8235*tension*tension*tension-46.365*tension*tension+146.14*tension-23.622;
822     lcd.setCursor(0,3);
823     lcd.print("|");
824     lcd.print(turbidez,2);
825     lcd.print("|");
826     turbidez=turbidez_p+kalman_gain*(turbidez-turbidez_p);
827     lcd.print("|");
828     lcd.print(turbidez,2);
829     lcd.print("|");
830     incertidumbre=(1-kalman_gain)*incertidumbre_p;
831     delay(10);
832     lcd.setCursor(0,1);
833     lcd.print("                "); //Limpiar linea
834     lcd.setCursor(0,3);
835     lcd.print("                "); //Limpiar linea
836     i++;
837   }
838
839 }
840 //FILTRAR DATOS
841 numDatos=0;
842 totalMeasure = 0;
843 for(i=0;i<1000;i++)
844 {
845   if(arrayMeasure[i]!=0)
846   {
847     numDatos++;
848   }
849   totalMeasure=totalMeasure+arrayMeasure[i];
850 }
851 mediaMeasure=totalMeasure/numDatos;
852 numDatos=0;
853 totalMeasure=0.0;
854 for(i=0;i<1000;i++)

```

Figura 3.29 Código medición de turbidez, método enfrentados. Parte 2 de 3.

En esta segunda parte se puede ver el final de la representación en directo de las mediciones obtenidas, donde se muestra la ecuación utilizada para la conversión de los valores obtenidos de tensión a los valores de turbidez. Dicha ecuación se ha obtenido de la curva de calibración. Esta calibración se ha realizado de forma empírica en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad del País Vasco del Campus de Vizcaya ubicado en Leioa.

Cada curva de calibración y por tanto cada ecuación debe ser específica de cada circuito y cada método empleado. La ecuación que se presenta hace referencia al método de medición situando el receptor y emisor a 90°.

Para realizar la calibración empírica se han preparado dos disoluciones. Una de ellas de almidón y otra de Montmorillonite, un tipo de arcilla. En la siguiente figura se muestran las disoluciones mencionadas, siendo la primera agua pura, la segunda la disolución de almidón y la última la disolución de Montmorillonite.



Figura 3.30 Disoluciones para las mediciones de turbidez.

Una vez preparadas las disoluciones se han dejado reposar durante 24 horas y se ha pipeteado en un bote con el tamaño de los patrones usados para la calibración del turbidímetro profesional. A la hora de pipetear se ha obtenido el agua de la superficie de las disoluciones, intentando no pipetear partículas en suspensión grandes e intentando no generar burbujas que puedan interferir en las mediciones.

Una vez preparada la muestra se han ido realizando mediciones en primer lugar en el turbidímetro profesional, 2100N TURBIDIMETER de HACH, y tras obtener el valor real de la muestra, se ha pasado al turbidímetro diseñado y se han registrado los valores de divisiones obtenidos a dicha turbidez.



Figura 3.31 Turbidímetro HACH 2100N.

Al ir diluyendo la disolución poco a poco se ha conseguido obtener la curva de calibración y de esta la ecuación.

```

856   if (arrayMeasure[i]!=0)
857   {
858       if ((arrayMeasure[i]>(mediaMeasure-mediaMeasure*0.2))
859           || (arrayMeasure[i]<(mediaMeasure+mediaMeasure*0.2)))
860       {
861           numDatos++;
862           totalMeasure=totalMeasure+arrayMeasure[i];
863       }
864   }
865   }
866   mediaMeasure=totalMeasure/numDatos;
867   mediaTension = mediaMeasure*5/1023;
868   mediaTurbidez = 9.8235*mediaTension*mediaTension*mediaTension-46.365*mediaTension*mediaTension+146.14*mediaTension-23.622;
869   //MOSTRAR RESULTADO
870   lcd.clear();
871   delay(500);
872   lcd.setCursor(0,0);
873   lcd.print("MEDICION: ");
874   lcd.print(mediaMeasure,2);
875   lcd.setCursor(0,1);
876   lcd.print("TENSION: ");
877   lcd.print(mediaTension,2);
878   lcd.setCursor(0,2);
879   lcd.print("    TURBIDEZ");
880   lcd.setCursor(0,3);
881   lcd.print("    ");
882   lcd.print(mediaTurbidez,2);
883   lcd.print("NTU");
884   digitalWrite(DIGITAL_TURBIDIMETRO_1,LOW);
885   return (mediaTurbidez);
886   }
887   /*****/

```

Figura 3.32 Código medición de turbidez, método enfrentados. Parte 3 de 3.

En la última parte del código, se recogen todas las mediciones realizadas y se calcula el valor medio, que tras filtrarlo se vuelve a recalcular y se acaba mostrando en la pantalla final de la medición, que se muestra a continuación.

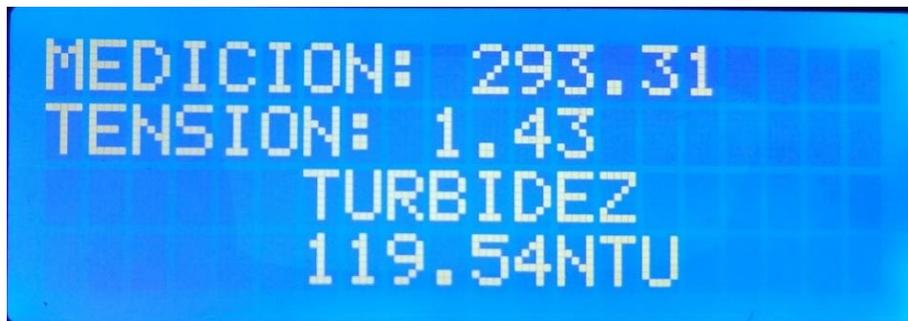


Figura 3.33 Pantalla final de la medición de turbidez.

A la hora de realizar la calibración únicamente se deberá prestar atención al dato de “Medición” ya que el valor de turbidez que se estará mostrando se basará en una ecuación con una curva de calibración obsoleta, pero que se ha decidido mostrar para detectar posibles alteraciones excesivas en dicho valor.

Una vez calibrado se puede proceder a realizar las mediciones de disoluciones reales. El código empleado será exactamente el mismo que a la hora de realizar una calibración con la excepción de que este dato si se enviara a la plataforma de internet of Things para su almacenamiento en la nube, como se explica en el próximo apartado.

3.4 - Microcontrolador

En este apartado se explicarán aspectos generales que afectan al microcontrolador, como, por ejemplo, los aspectos gráficos que no se han explicado, pero que, si se muestra en el código de los apartados anteriores, las conexiones con el resto de dispositivo de forma general, para poder ver de forma clara cómo será la disposición en el Arduino Mega, junto a pulsadores, para permitir navegar por los menús.

Respecto al aspecto grafico del proyecto, se ha realizado el mismo código para dos display. Se optó inicialmente por el display TFT de Adafruit, de tamaño pequeño, capaz de mostrar gráficos o menús visualmente más atractivos, pero al utilizar el protocolo de comunicaciones SPI, entraba en conflicto con el modulo ethernet que utiliza el mismo protocolo. A continuación, se muestran las conexiones necesarias para el modulo.

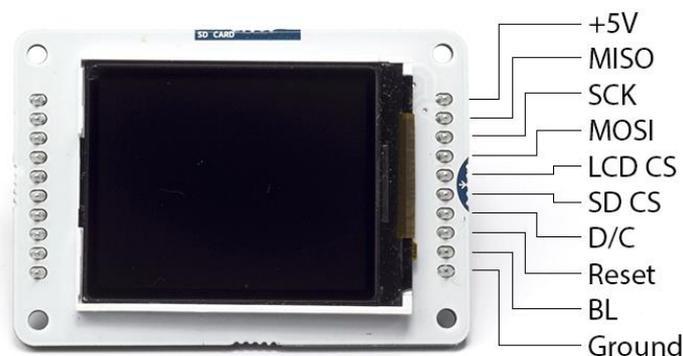


Figura 3.34 Conexiones display Adafruit. [30]

Tras realizar varias pruebas donde compartían los pines MISO, MOSI y CLK y se configuraba el Slave Select de cada módulo en un pin distinto para activar el modulo poniendo abajo la señal y en alto para desactivar el modulo, no se ha conseguido que puedan ser compatibles es modulo ethernet con el display TFT. Al conectarse ambas, únicamente predominaba el display, independientemente del estado del Slave Select.

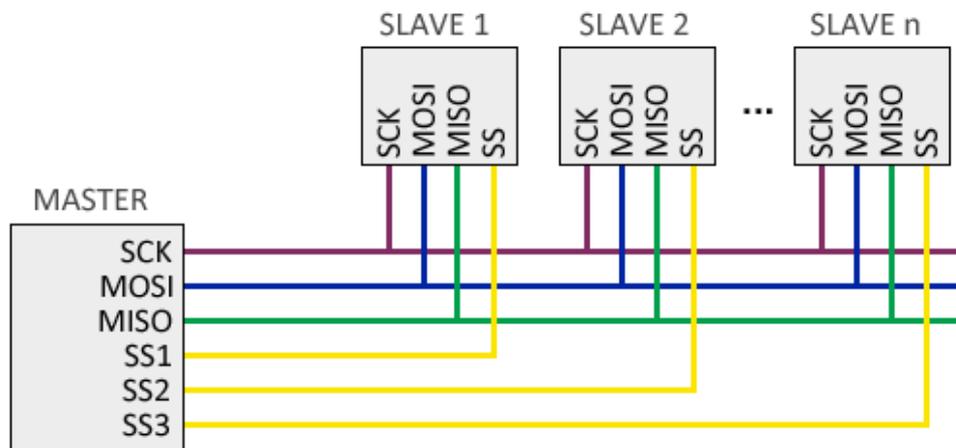


Figura 3.35 Comunicación SPI con múltiples esclavos. [31]

Se debe tener en cuenta que cada módulo consta de dos módulos internos. El display junto al módulo del display gráfico, y dispone de un módulo interno para el control de la tarjeta SD. De igual forma, el modulo ethernet aparte del microcontrolador para la establecer la comunicación, consta de otra tarjeta SS.

Finalmente se consultó en la web del fabricante y muchos usuarios presentaban el mismo problema, por lo que se decidió sustituir el display TFT por un display LCD. Este display es de tamaño más grande pero menos flexible en la representación de los datos, pero sin ninguna incompatibilidad con el modulo ethernet ya que este utiliza el protocolo I2C para comunicarse con el Arduino Mega. Para esta comunicación incorpora un controlador HD44780 permitiendo acceder al LCD a través del bus I2C. A continuación, se muestra las conexiones realizadas para el correcto funcionamiento del mismo.



Figura 3.36 Esquema de conexiones display LCD. [32]

Por otro lado, para navegar por los menús se han utilizado 3 pulsadores, que realizaran la función de arriba, abajo y seleccionar opción. Con estos se realiza el control por los distintos menús. Para seleccionar la función deseada se ha seguido en todos los menús el mismo formato. Un bucle ínfimo que detecta las pulsaciones de los botones, y dependiendo del pulsador activado, realizara una función u otra. Los pulsadores arriba y abajo en caso de no haber llegado a su posición más alta o más baja en el menú respectivamente, subirá o bajará el cursor.

Se ha utilizado el siguiente circuito para cada pulsador, estando normalmente abajo la señal y ponerse el arriba al ser presionada la tecla.

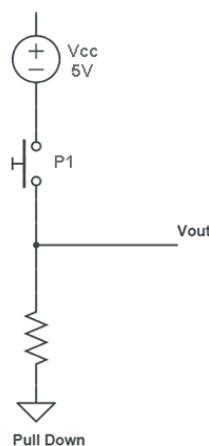


Figura 3.37 Circuito pulsadores de navegación. [33]

En el display TFT el cursor se muestra como una franja azul en la opción seleccionada y en el display LCD se muestra con el símbolo “->” delante de la opción actual.

El código utilizado para cada display es el mismo, con las únicas diferencias graficas de cada uno de ellos. Como finalmente se recomienda el uso del LCD se muestra a continuación el código utilizado en uno de los menús y el código utilizado para el movimiento del cursor que se realiza en una función aparte.

```

474 /*****
475 void pantallaCalibrarTurbidimetro (void)
476 {
477     int seleccion=0,metodo=0;
478     int i=0, linea=0;
479     //CONSTRUYE MENU
480     lcd.setCursor(0, 0);
481     lcd.print("->METODO 90");
482     lcd.setCursor(2, 1);
483     lcd.print("METODO ENFRENTADOS");
484     lcd.setCursor(2, 2);
485     lcd.print("METODO MIXTO");
486     lcd.setCursor(2, 3);
487     lcd.print("ATRAS");
488     //NAVEGA MENU
489     mueveCursor(seleccion); //CURSOR PRIMERA POSICION
490     while (metodo==0)
491     {
492         if (digitalRead(PULSADOR1) == HIGH
493             && digitalRead(PULSADOR2) == LOW
494             && digitalRead(PULSADOR3) == LOW)
495         { //SUBIR MENU
496             if(seleccion > 0)
497             {
498                 seleccion--;
499                 mueveCursor(seleccion);
500                 delay(200); //Antirrebote
501             }
502         }
503         else if (digitalRead(PULSADOR1) == LOW
504             && digitalRead(PULSADOR2) == HIGH
505             && digitalRead(PULSADOR3) == LOW)
506         { //SELECCIONAR
507             lcd.clear();
508             switch(seleccion)
509             {
510                 delay(200); //Antirrebote
511                 case 0:
512                     delay(500);
513                     metodo=1;
514                     delay(200);
515                     break;
516                 case 1:
517                     delay(500);
518                     metodo=2;
519                     delay(200);

```

Figura 3.38 Código menús. Parte 1 de 3.

En la fase inicial de la función se construye la pantalla imprimiendo el texto correspondiente a cada menú. En esta ocasión se muestra el menú de selección de método de medida para el turbidímetro. En todos los menús a excepción del inicial se muestra la opción atrás, que al seleccionarla le llevara al menú anterior. Se puede observar cómo tras cada pulsación se realiza una pequeña espera para evitar que se detecte más de una.

```

521     case 2:
522         delay(500);
523         metodo=3;
524         delay(200);
525         break;
526     case 3:
527         delay(500);
528         menuTurbidimetro();
529         delay(200);
530         break;
531     default:
532         break;
533 }
534 seleccion = 0;
535 }
536 else if (digitalRead(PULSADOR1) == LOW
537         && digitalRead(PULSADOR2) == LOW
538         && digitalRead(PULSADOR3) == HIGH)
539 { //BAJAR MENU
540     if(seleccion < 3)
541     {
542         seleccion++;
543         mueveCursor(seleccion);
544         delay(200); //Antirrebote
545     }
546 }
547 }
548 switch (metodo)
549 {
550     case 1://90°
551         medicionTurbidez90();
552         break;
553     case 2://Enfrentados
554         medicionTurbidezEnfrentados();
555         break;
556     case 3://Mixto
557         medicionTurbidezMixto();
558         break;
559     default:
560         break;
561 }
562 while (digitalRead(PULSADOR2) == LOW) //SALIR
563     lcd.clear();
564     delay(500);
565     menuTurbidimetro();
566 }

```

Figura 3.39 Código menús. Parte 2 de 3.

Finalmente, en esta parte 2, se puede observar cómo se ejecutará una función u otra dependiendo del método seleccionado y tras obtener los resultados se mantendrá

esperando la pulsación del usuario para borrar los valores obtenidos de la pantalla y regresar al menú anterior.

```

130 /*****
131 void mueveCursor (int posicionCursor)
132 {
133     int fila;
134     if(posicionCursorAnterior != posicionCursor)
135     { //CURSOR MOVIDO
136     //LIMPIAR ZONA CURSOR
137         for (fila=0;fila<FILAS_LCD;fila++)
138         {
139             lcd.setCursor(0,fila);
140             lcd.print(" ");
141         }
142     //DIBUJA CURSOR
143         lcd.setCursor(0,posicionCursor);
144         lcd.print("->");
145         posicionCursorAnterior = posicionCursor;
146     }
147 }
148 *****/

```

Figura 3.40 Código menús. Parte 3 de 3.

Es esta función a la que se hace referencia en los menús tras cada pulsación, primero realiza una limpieza del cursor anterior independientemente de su posición. Tras limpiarlo sitúa este en la nueva posición recibida desde el menú correspondiente.

Para poder ver de forma general las entradas y salidas conectadas al microcontrolador Arduino Mega se muestra a continuación el código donde se define cada una de ellas.

```

1 /*****
2 ****ANALIZADOR DE AGUA CONECTADO A INTERNET OF THINGS por JAVIER ARANA*****/
3 ****INGENIERIA SIN FRONTERAS PAIS VASCO || UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO*****/
4 *****/
5 //LIBRERIAS
6
7 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
8 #include <Thingernet.h>
9 //PULSADORES
10 #define PULSADOR1 48
11 #define PULSADOR2 49
12 #define PULSADOR3 46
13 //SENSORES
14 #define ANALOG_TEMPERATURA A0
15 #define ANALOG_PH A1
16 #define ANALOG_TURBIDIMETRO_1 A2
17 #define ANALOG_TURBIDIMETRO_2 A3
18 #define DIGITAL_TURBIDIMETRO_1 47
19 //PANTALLA
20 #define DIRECCION_LCD 0x27
21 #define COLUMNAS_LCD 20
22 #define FILAS_LCD 4
23 LiquidCrystal_I2C lcd(DIRECCION_LCD, COLUMNAS_LCD, FILAS_LCD);

```

Figura 3.41 Declaración de constantes Arduino Mega.

Como se puede observar en las líneas de código anteriores, cada entrada o salida se le ha asignado un nombre para facilitar la comprensión y favorecer la reutilización del código. En el caso de querer cambiar de pin simplemente se deberá modificar desde las primeras líneas de código donde se definen como constantes y el código quedara adaptado automáticamente a la nueva configuración.

3.5 - Comunicaciones

Para el envío de los datos se optó inicialmente por utilizar comunicaciones del tipo GSM utilizando el GSM SIM800L, al únicamente ser necesaria disponer de cobertura lo que facilitaba la portabilidad del sistema, pero finalmente a causa de sus costes añadidos en cada transmisión se decidió sustituirlo por el modulo ethernet. Este módulo consta de un microcontrolador que gestiona la comunicación del Arduino a través del RJ45 al router.

Las conexiones son extremadamente sencillas al tratarse de un shield, es decir, el modulo se conecta encima del Arduino Mega. Este módulo utiliza el protocolo de comunicación SPI. Incluye una pila TCP/IP por hardware y un buffer de 16Kbytes para las transmisiones Tx/Rx. Este módulo en específico incorpora un lector de tarjeta SD. Admite velocidades de 10/100 Mbits/s y soporta modos Full-Duplex y Half-Duplex con corrección automática de polaridad.

Se debe tener en cuenta que la mayoría de routers actuales de uso doméstico constan de un protocolo DHCP que asigna automáticamente una IP libre al módulo, por lo que no debería haber ningún problema en el uso doméstico.

Pero enfocado a una universidad por ejemplo o una empresa, estas presentan unas comunicaciones restringidas. Para este proyecto en concreto se intentó conectar a la nube desde el laboratorio de química de la universidad del campus de Leioa y no se pudo hacer uso de estas comunicaciones tras consultar con el Centro de Atención a Usuarios (CAU) de dicha universidad encargada de la gestión de las comunicaciones. Para poder hacer uso de estas únicamente se deberá realizar una solicitud formal para que nos asignen una MAC y autoricen las comunicaciones.

Tras conectar satisfactoriamente el modulo ethernet, se ha utilizado una plataforma Open-Source de Internet of Things llamada Thinger.io ubicada en Madrid y en pleno desarrollo para el envío y recepción de datos.

Para enviar los datos a esta plataforma se convierten a JSON los datos y se les asigna una etiqueta. Haciendo uso de la librería para Arduino desarrollada por los mismos creadores de la plataforma llamada "ThingerEthernet.h" se ha desarrollado el siguiente código para que el envío de datos sea lo más fluido posible.

```

1  /*****
2  #include <Thingernet.h>
3
4  #define USERNAME "JavierArana"
5  #define DEVICE_ID "arduino"
6  #define DEVICE_CREDENTIAL " "
7
8  Thingernet thing(USERNAME, DEVICE_ID, DEVICE_CREDENTIAL);
9
10 //SENSORES
11 #define ANALOG_TURBIDIMETRO_1 A2
12 #define ANALOG_TURBIDIMETRO_2 A3
13 #define DIGITAL_TURBIDIMETRO_1 47
14 //VARIABLES
15 float var_sensor = 0.01,q=0.00001,tension = 0.0, measure = 0.0,turbidez = 0.0;
16 float turbidez_anterior = 0.0,incertidumbre = 10, incertidumbre_anterior = 0.0;
17 float kalman_gain, turbidez_p, incertidumbre_p,medicion_turbidez;
18 float measure1=0.0,measure2 = 0.0,measureTotal=0.0,mediaTension=0.0;
19 float arrayMeasure[1000],mediaMeasure=0.0,mediaTurbidez=0.0;
20 double totalMeasure=0.0;
21 int i,numDatos=0,valueMetodo=0;
22
23 void setup() {
24   pinMode(DIGITAL_TURBIDIMETRO_1,OUTPUT);
25   digitalWrite(DIGITAL_TURBIDIMETRO_1, LOW);
26   pinMode(ANALOG_TURBIDIMETRO_1,INPUT);
27   pinMode(ANALOG_TURBIDIMETRO_2,INPUT);

```

Figura 3.42 Comunicaciones turbidímetro. Parte 1 de 5.

En esta primera parte, en las líneas del código 4, 5 y 6 se sincroniza con el servidor de Thingier.io, introduciendo las credenciales con las que se ha realizado el registro.

```

28   thing["led"] << digitalPin(DIGITAL_TURBIDIMETRO_1);
29   thing["Metodo 1,2 o 3"] << [] (psons in){
30     in["Metodo"] = (int) in["valueMetodo"];
31   };
32   thing["MedicionTurbidez"] >> [] (psons out){
33     out["Medicion"] = funcionMedida();
34     out["Turbidez"] = funcionTurbidez();
35   };
36 }
37 void loop() {
38   thing.handle();
39   thing.stream(thing["MedicionTurbidez"]);
40   thing.write_bucket("BaseDatosTurbidimetro", "MedicionTurbidez");
41   funcionTurbidez();
42 }
43 float funcionTurbidez (void)
44 {
45   mediaMeasure=funcionMedida();
46   mediaTension = mediaMeasure*5/1023;
47   mediaTurbidez = 9.8235*mediaTension*mediaTension*mediaTension-46.365*mediaTension*mediaTension+146.14*mediaTension-23.622;

```

Figura 3.43 Comunicaciones turbidímetro. Parte 2 de 5.

En el “setup” se han configurado los pines que se utilizarán y los parámetros que se mostrarán o se recibirán desde la plataforma de Thingier.io.

Una vez configurado, el “loop” deberá ser lo más breve posible para que el refresco de datos en la plataforma se realice casi instantáneamente. Para esto, se debe activar en la plataforma la opción “From Device” y “Update by Device” al crear un gráfico dinámico y en el código se deben añadir las líneas 45, 46 y 47 que forzará el envío de datos refrescando el grafico en la web.

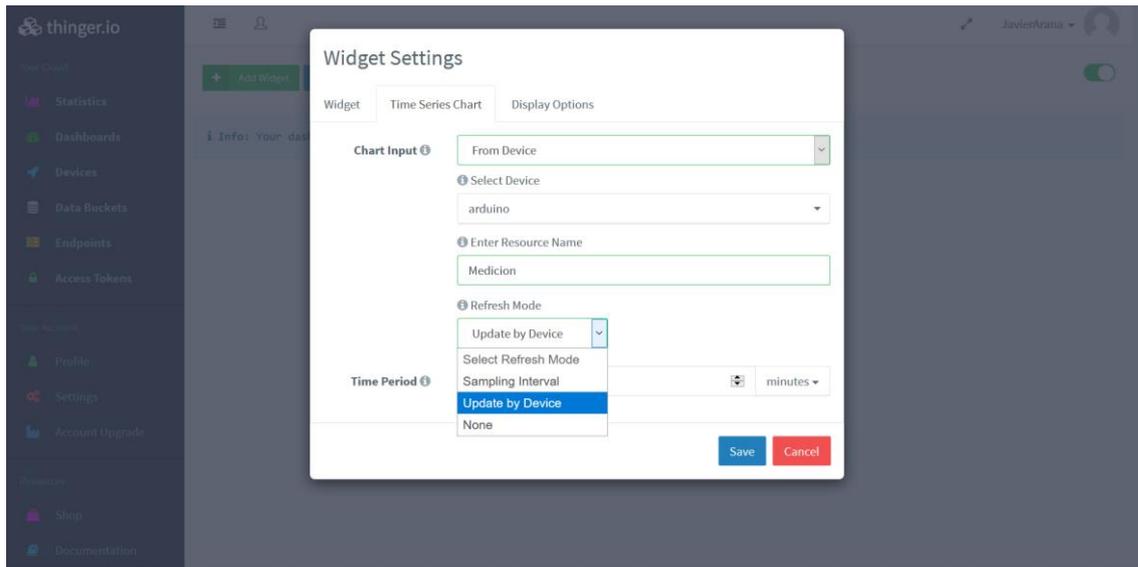


Figura 3.44 Forzar refresco de datos en Thingier.io.

De igual forma, para actualizar la base de datos en directo, se debe añadir el código mostrado en la línea 40, y configurarla eligiendo la opción “From write call” de la siguiente manera en la plataforma.

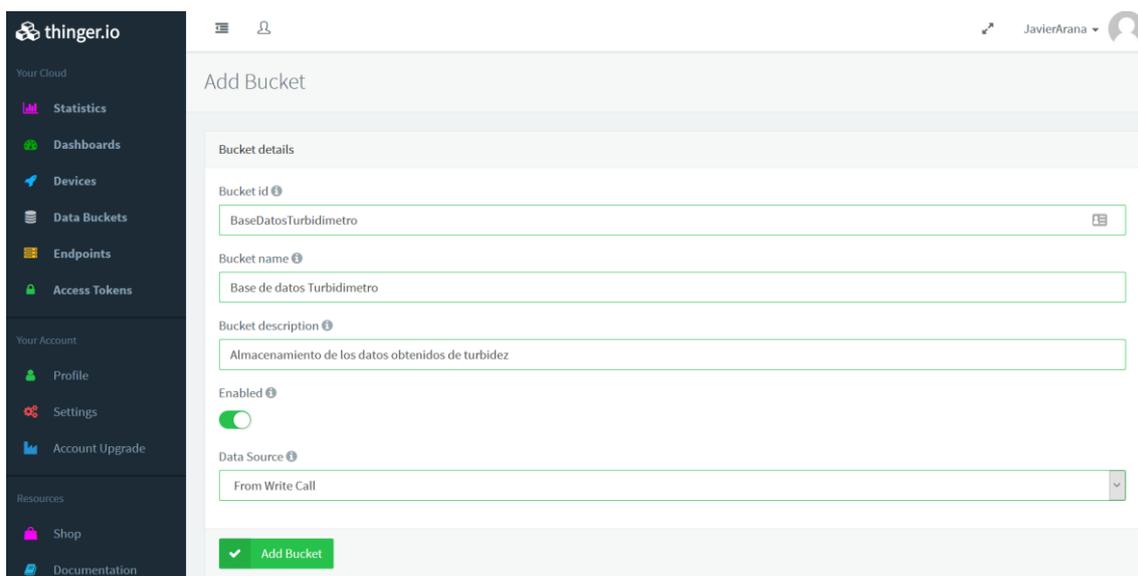


Figura 3.45 Configuración base de datos Thingier.io.

Como se puede observar el código es independiente al utilizado para el control manual del sistema, sin pulsadores ni display gráfico. Estas funciones son prescindibles al utilizar la plataforma de Internet of Things y se podrían ahorrar costes prescindiendo de ellas.

La ejecución del código para ser fluida debe ser lo más breve posible. Se ha conseguido que se envíen los datos y se actualice los gráficos cada segundo. Cada valor mostrado en el gráfico es el resultado de la media y el filtrado de mil muestras obtenidas por el microcontrolador. Como se muestra en las siguientes líneas de código, comunes con el

código mostrado anteriormente en este mismo apartado en las figuras referentes al “Código medición de turbidez, método enfrentados”.

```

54     return mediaTurbidez;
55 }
56 float funcionMedida(void)
57 {
58     //FORMATEAR ALMACENAMIENTO MEDIDAS
59     for (i=0;i<1000;i++)
60     {
61         arrayMeasure[i]=0;
62     }
63     i=0;
64     while (i<1000)
65     {
66         //FILTRO DE KALMAN
67         turbidez_anterior=turbidez;
68         incertidumbre_anterior=incertidumbre;
69         turbidez_p=turbidez_anterior;
70         incertidumbre_p=incertidumbre_anterior+g;
71         kalman_gain=incertidumbre_p/(incertidumbre_p+var_sensor);
72         //OBTENER DATOS
73         switch (valueMetodo)
74         {
75             case 1://90
76                 measure1=analogRead(ANALOG_TURBIDIMETRO_1);
77                 measure2=0.0;
78                 break;
79             case 2://Enfrentados

```

Figura 3.46 Comunicaciones turbidímetro. Parte 3 de 5.

```

81         measure1=0.0;
82         measure2=analogRead(ANALOG_TURBIDIMETRO_2);
83         break;
84     case 3://Mixto
85         measure1=analogRead(ANALOG_TURBIDIMETRO_1);
86         measure2=analogRead(ANALOG_TURBIDIMETRO_2);
87         break;
88     default:
89         break;
90 }
91 measure=measure1+measure2;
92 if (measure>10)
93 {
94     arrayMeasure[i]=measure;
95     tension = measure*5/1023;
96     turbidez = 9.8235*tension*tension*tension-46.365*tension*tension+146.14*tension-23.622;
97     turbidez=turbidez_p+kalman_gain*(turbidez-turbidez_p);
98     incertidumbre=(1-kalman_gain)*incertidumbre_p;
99     i++;
100 }
101 }
102 //FILTRAR DATOS
103 numDatos=0;
104 totalMeasure = 0;
105 for (i=0;i<1000;i++)
106 {

```

Figura 3.47 Comunicaciones turbidímetro. Parte 4 de 5.

```

108     if (arrayMeasure[i]!=0)
109     {
110         numDatos++;
111     }
112     totalMeasure=totalMeasure+arrayMeasure[i];
113 }
114 mediaMeasure=totalMeasure/numDatos;
115 numDatos=0;
116 totalMeasure=0.0;
117 for (i=0;i<1000;i++)
118 {
119     if (arrayMeasure[i]!=0)
120     {
121         if ((arrayMeasure[i]>(mediaMeasure-mediaMeasure*0.2))
122             || (arrayMeasure[i]<(mediaMeasure+mediaMeasure*0.2)))
123         {
124             numDatos++;
125             totalMeasure=totalMeasure+arrayMeasure[i];
126         }
127     }
128 }
129 mediaMeasure=totalMeasure/numDatos;
130 return mediaMeasure;
131 }
    
```

Figura 3.48 Comunicaciones turbidímetro. Parte 5 de 5.

Las limitaciones que se han encontrado han utilizar esta plataforma han sido, la baja frecuencia de almacenamiento de datos en la base de datos, que almacena cada minuto, y, por otro lado, la disposición de las pantallas. Para el correcto funcionamiento se deben tener abiertas tres pantallas, una de ellas para activar o desactivar señales llamada " API Explorer", la segunda de ellas el monitor llamado "Dashboards" donde se muestran los distintos modos de representación de los datos, y por último la base de datos llamada "Data Buckets".

A pesar de estas limitaciones, su flexibilidad y facilidad para adaptar las herramientas que ofrece esta plataforma a cada proyecto hace de esta una opción muy interesante para el presente o futuros proyectos.

A continuación, se describirá de forma breve las diferentes funcionalidades que ofrece la plataforma y como se han utilizado en el actual proyecto.

- **Conexión:** Para conectar el Arduino con la plataforma mediante ethernet únicamente es necesario configurar las siguientes credenciales en la plataforma y añadirlos en el código, como se muestra en la parte 1 de 5 del código.

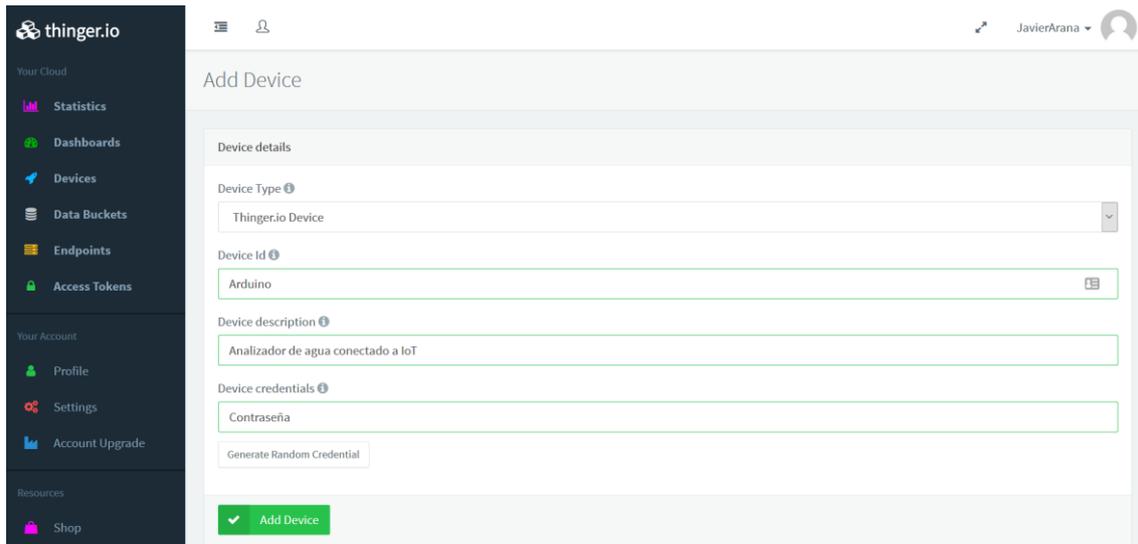


Figura 3.49 Credenciales Thinger.io.

Con esto el dispositivo ya está enlazado y se mostrará en el siguiente menú.

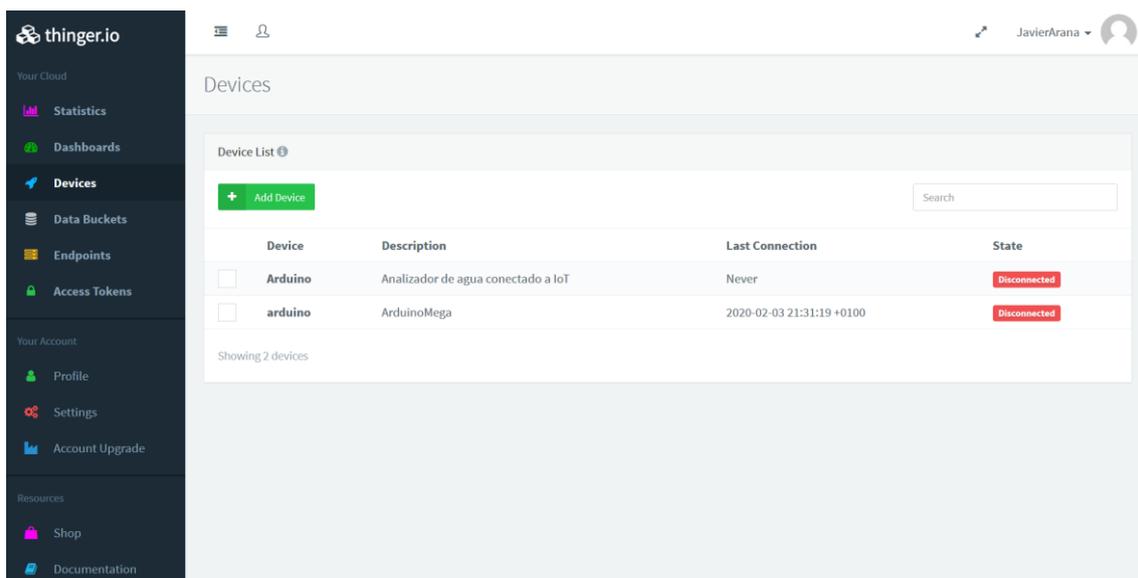


Figura 3.50 Menú de dispositivos, Thinger.io.

- Control del sistema: Como se ha mencionado anteriormente, se puede prescindir de los pulsadores sustuyéndolos por pulsadores en la misma plataforma. De esta forma se podrá activar/desactivar el Led infrarrojo cuando se desee o activar/desactivar cada receptor para pasar de un método a otro.
- Monitor: En la siguiente pantalla, se pueden configurar diferentes formas para visualizar los datos. Permite editarse a gusto del usuario, asociando cada "Widget" a una etiqueta declarada en el microcontrolador.

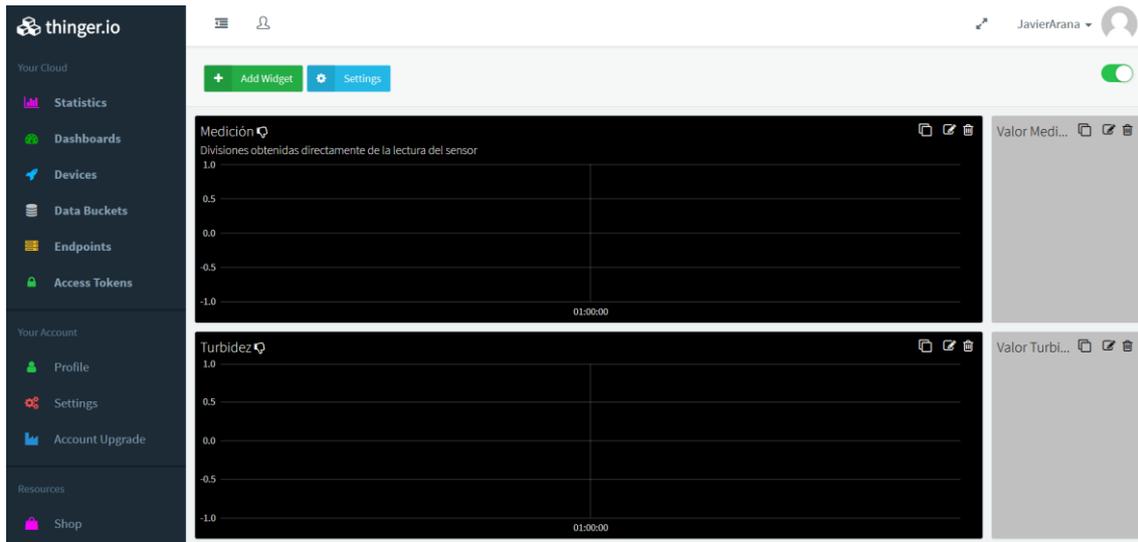


Figura 3.51 Pantalla monitores Thinger.io.

- Base de datos: La base de datos o “data buckets”, almacena una medición por cada minuto en caso de no haber seleccionado la opción “From Write Call”. Al elegir esta opción almacenara el último dato obtenido al ejecutar la línea 40 del código. Da la opción a poder descargar los datos registrados en formato *Comma Separated Values* (CSV), *Attribute-Relation File Format* (ARFF) y *JavaScript Object Notation* (Json). Al pulsar en exportar se enviará el archivo al correo con el que se ha registrado en la plataforma.
- *Endpoints*: Esta funcionalidad no ha sido implementada, pero se expone al ser de gran interés para poderse implementar en futuros proyectos. Los *Endpoints* permite al usuario colocar alarmas en el sistema de forma sencilla. Si excede el límite fijado, por ejemplo, la plataforma enviara un correo al usuario avisando de este hecho. Esto combinado con la herramienta IFTT podría aportar grandes avances a futuros proyectos.

4 - ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se describe el grado de cumplimiento de los resultados esperados para cada sensor. Para obtener los resultados se han realizado las siguientes pruebas.

4.1 - Prueba 1: Sensor temperatura

Para verificar el funcionamiento del sensor se ha adquirido un termómetro sumergible para acuarios. Dispone de un pequeño display LCD y es capaz de operar entre -10°C hasta 50°C . Tiene una precisión baja de más menos 1°C , pero ha servido para verificar que las mediciones del sensor desarrollado se corresponden con las mediciones del termómetro comercial.

Se han realizado tres mediciones a diferentes temperaturas. La primera de ellas dentro del rango aceptable para realizar el resto de mediciones, es decir a temperatura ambiente. La segunda y tercera prueba han sido a temperatura por debajo y por encima del rango aceptable. Una de ellas a 10°C , y la otra a 44°C .

Los resultados obtenidos han sido muy positivos. Se ha podido observar como los valores obtenidos se correspondían con el sensor comercial adquirido.



Figura 4.1 Prueba 1. Sensor Temperatura.

Por desgracia, se ha optado por verificarlo con un sensor de bajo coste y baja precisión, por lo que no se ha podido definir la especificación de la precisión del sensor diseñado.

4.2 - Prueba 2: Sensor pH

Para esto se han adquirido unos sobres con unos patrones de pH4,00, pH6,86 y pH9,18 a 25°C . En estos, viene indicado como varía el pH respecto a la temperatura. Como puede comprobarse en la siguiente tabla, la variación máxima dentro del rango de 20°C a 30°C es de 0.05, y teniendo en cuenta que la precisión del pH-metro seleccionado es de $\pm 0,1\text{pH}$ se aceptará el error generado por una variación de la temperatura.

Tabla 4.1 Variación del pH en los patrones respecto a la temperatura.

°C	pH4,00	pH6,86	pH9,18
10	4	6,92	9,33
15	4	6,9	9,28
20	4	6,88	9,23
25	4	6,86	9,18
30	4,01	6,85	9,14
35	4,02	6,84	9,1
40	4,03	6,84	9,07
45	4,04	6,83	9,04
50	4,06	6,83	9,02

Para realizar la prueba se ha tenido la muestra a temperatura ambiente y se ha comprobado con el sensor de temperatura que se encontraba dentro del rango aceptable de temperatura. Junto a los patrones, al disponer en el laboratorio de un pH-metro profesional de alta precisión se han realizado numerosas pruebas con los tres patrones adquiridos.



Figura 4.2 Prueba 2: PH meter GLP22.

Los resultados obtenidos han sido acordes a los especificados por el fabricante. Una precisión algo baja, pero suficiente para el objetivo del proyecto, un precio adecuado, pero un tiempo de respuesta muy bajo dependiendo del pH de la muestra a analizar.

4.3 - Prueba 2: Sensor turbidez

Las pruebas únicamente se han realizado para la primera hipótesis, es decir, situando el emisor y el receptor el uno del otro a 90°. No se han podido obtener resultados coherentes de las otras dos hipótesis planteadas ya que se producía la saturación del receptor empleado. Por tanto, para poder plantear y realizar pruebas de las dos hipótesis mencionadas, se debe realizar un circuito acondicionador independiente para cada una de ellas, siendo imposible realizarlas conjuntamente como se pretendía en el proyecto actual.

Para las pruebas de turbidez se han realizado con los siguientes patrones de turbidez.

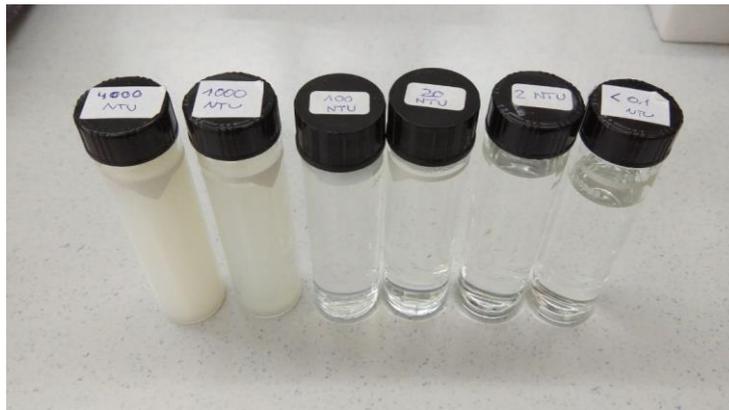


Figura 4.3 Patrones turbidez 1.



Figura 4.4 Patrones turbidez 2.

Al realizar las pruebas se ha podido observar como al superponer la muestra de 500NTU el receptor se satura, por lo que se ha fijado el rango efectivo superior a este valor. Y respecto al límite efectivo inferior se ha situado en 30NTU, a causa de que las mediciones realizadas con baja turbidez empezaban a ser incongruentes al detectar el sensor de forma aleatoria una partícula que disparaba la medida de turbidez y que se elimina con los filtros usados en el algoritmo del programa.

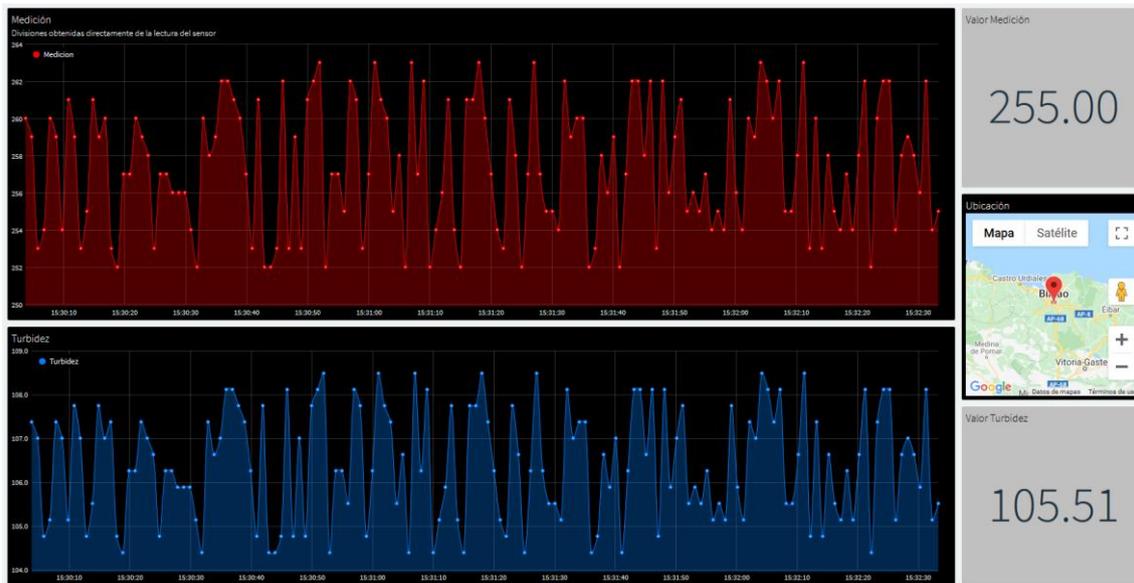


Figura 4.5 Datos turbidez en la plataforma Thinger.io

Como se puede observar en la figura anterior los valores obtenidos tienen una precisión de más o menos 13 NTUs. A menor turbidez, la precisión del sensor disminuye, pero el tiempo de recepción es extremadamente más rápido que el turbidímetro profesional que varía su valor hasta estabilizarse rondando los 5 minutos para las muestras de menor turbidez.

5 - METODOLOGÍA

En este apartado, se describirá la metodología seguida para desarrollar el proyecto actual, definiendo las fases de las que consta el trabajo y describiendo las tareas asociadas a cada una de ellas, junto al procedimiento seguido para complementar todas las fases. Finalmente se adjuntará el cronograma de Gantt para facilitar la comprensión general de la magnitud del proyecto actual.

El trabajo ha constado de siete fases:

- Contexto: Se ha analizado el contexto en el que se enmarca el proyecto, teniendo en cuenta la realidad del pueblo salvadoreño a la hora del diseño.
- Sensor de temperatura: En esta fase se ha desarrollado el sensor de temperatura, realizando el diseño de hardware y software correspondiente.
- Sensor de pH: En esta fase se ha seleccionado el pH-metro que más se ajusta a los objetivos fijados para el proyecto y se ha desarrollado el software para adaptarlo al sistema.
- Sensor de turbidez: Diseño del turbidímetro y desarrollo de las hipótesis fijadas.
- Comunicaciones: Establecer las comunicaciones con el modulo ethernet desde el Arduino Mega a la plataforma Thingier.io.
- Pruebas laboratorio: Finalmente se ha realizado las mediciones en el laboratorio de Ingeniería Química de la UPV/EHU del Campus de Bizkaia.
- Análisis de los resultados: Tras obtener los datos se ha realizado un estudio de los resultados obtenidos y se ha comparado con las hipótesis planteadas.

Para completar cada una de ellas se han realizado cuatro tareas similares para las fases relacionadas con el desarrollo de los sensores, siendo estas específicas de cada sensor, pero siguiendo el mismo proceso en cada uno de las partes a desarrollar. Para desarrollar cada sensor las cuatro tareas que se han definido son, el estudio inicial del parámetro a medir, el estudio de las alternativas, el desarrollo del circuito acondicionador y, por último, el desarrollo del software.

Para el contexto, se ha estudiado la historia de El Salvador y el presente, a nivel económico, político y social del país. Junto a esta tarea se han estudiado anteriores proyectos realizados por Ingeniería Sin Fronteras País Vasco donde se enmarca el actual proyecto.

El objetivo de conectar las mediciones obtenidas con la nube se ha realizado en cuatro tareas. La primera de ellas ha sido la de realizar un estudio de las alternativas de comunicación con internet, posteriormente se ha realizado un estudio de las plataformas de Internet of Things de Open Source para analizar posteriormente los datos en esta. Finalmente, las últimas dos tareas corresponden al desarrollo de hardware y de software para completar las comunicaciones.

Para realizar las pruebas de laboratorio se ha separado cada sensor en dos partes. La primera de ellas corresponde a la tarea de calibrar los sensores. Y la segunda parte corresponde a la obtención de los resultados.

Por último, se ha analizado los resultados en dos tareas distintas. Se ha analizado los datos obtenidos mediante las mediciones en el laboratorio. Y, por otro lado, se ha observado el funcionamiento de la plataforma de Internet of Things Thinger.io.

Para dar por terminada cada fase se han completado las tareas asociadas a esta de forma satisfactoria. El proceso que se ha seguido para completar el proyecto se ha dividido en dos fases.

La primera de ellas, son las fases referentes al diseño de cada sensor. Estas se han realizado de forma independiente empezando por el display y la botonera, que se ha ido combinando de forma independiente con cada uno de los sensores. Al completar la fase referente a un sensor se ha aislado dicho sistema y se ha repetido el proceso con el siguiente sensor.

Al acabar todas estas fases, se ha enlazado el módulo de ethernet para realizar las comunicaciones enviando un simple dato sin asociación real a ningún sensor.

Una vez concluido este desarrollo se ha sustituido dichos datos por una medición real de uno de los sensores. Al realizarlo correctamente se ha ido sumando sensores. Esto supuso una ralentización en las comunicaciones excesiva para el propósito por lo que se decidió utilizar distinto código en cada sensor si se deseaba realizar las comunicaciones con la plataforma de Internet of Things.

A continuación, se adjunta el diagrama de Gantt para facilitar la comprensión de la magnitud general del proyecto.

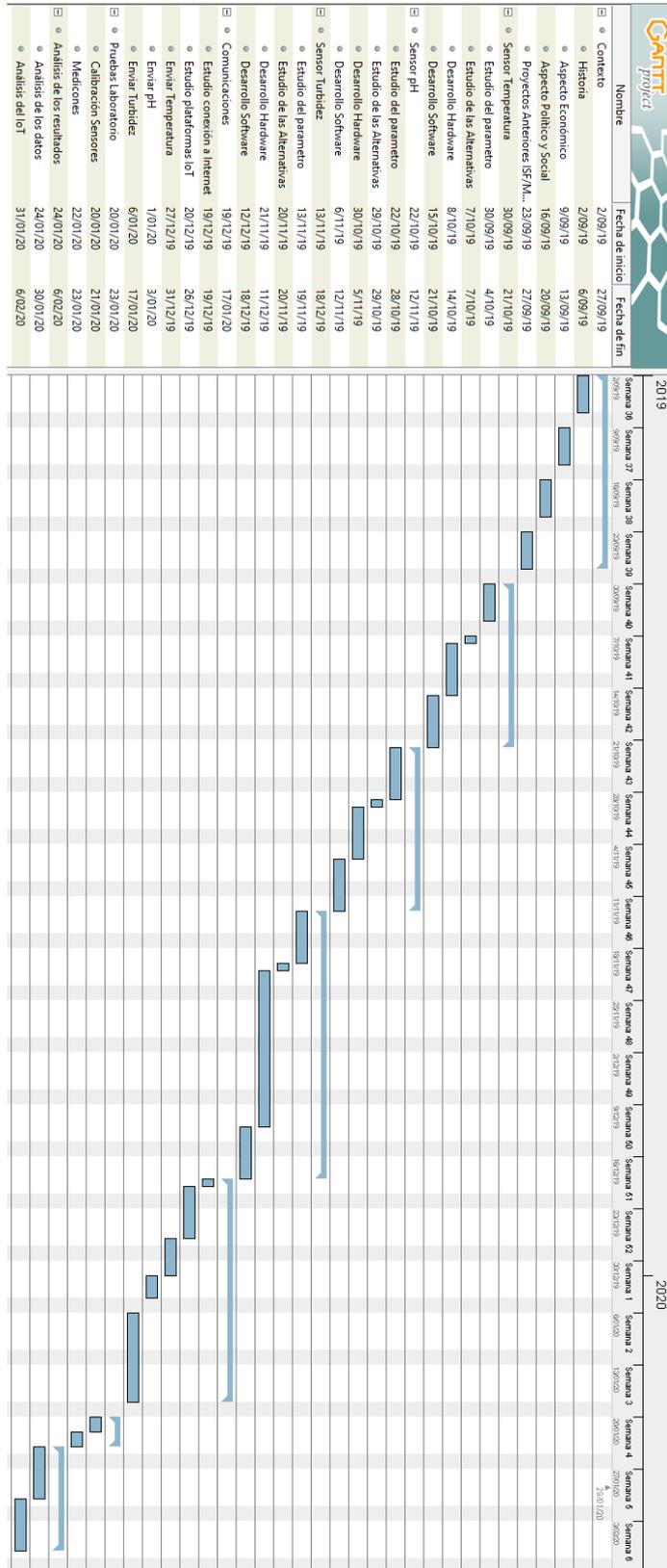


Figura 5.1 Diagrama de Gantt.

6 - PRESUPUESTO

En este apartado se expondrá el aspecto económico del proyecto. Se ha dividido en dos partes, la primera de ellas será el presupuesto necesario para fabricar el prototipo, y en la segunda parte se ha incorporado ha dicho presupuesto el coste de la realización de todo el proyecto.

El objetivo es que se conozca el coste del prototipo y a la vez el coste total, que incluye los sensores comerciales o los patrones para la realización de las pruebas.

Tabla 6.1 Presupuesto analizador de agua conectado a IoT.

	PRECIO (€/UNIDAD)	CANTIDAD	TOTAL (€)
Arduino Mega	43,89	1	43,89
Shield Ethernet W5100	12,19	1	12,19
Display TFT	30,24	1	30,24
Display LCD 2004A	5,95	1	5,95
2N3904	0,14	1	0,14
OPT101	6,27	2	12,54
PT100	1,12	1	1,12
SFH 4554	0,69	1	0,69
SIM900	26,89	1	26,89
pH-metro	25,62	1	25,62
Patrones pH	6,99	1	6,99
Patrones Turbidez	115,00	1	115,00
Resistencia 1k Ω	0,05	3	0,15
Resistencia 100 Ω	0,05	1	0,05
Resistencia 480 Ω	0,05	1	0,05
ALM143	16,50	1	16,50

COSTE:291,02€
IVA (21%):61,11€
TOTAL:352,13€

Bilbao, 8 de febrero de 2020

Javier Arana Obra

El presupuesto para realizar el prototipo sería de 118,89€ al prescindir de los patrones de pH y turbidez, junto a el display TFT y la tarjeta de comunicaciones GSM SIM900 de las que finalmente se ha optado por otras alternativas.

Dado el carácter de investigación del proyecto, no se han presupuestado las horas de ingeniería ni las consultorías al personal químico que han sido necesarias para la realización del mismo.

7 - CONCLUSIONES Y LINEAS DE DESARROLLO FUTURAS

Tras los resultados obtenidos en este proyecto se han sacado las siguientes conclusiones en cada objetivo fijado.

Ob.1. Estudio del contexto en el que se enmarca el proyecto. Conocer la realidad del pueblo salvadoreño adaptando el diseño de este a las necesidades que se presenten.

Se ha estudiado de manera exhaustiva los proyectos realizados anteriormente y el contexto en el que se enmarca el actual proyecto. Por lo tanto, se da por completado el primer objetivo del proyecto.

Ob.2. Diseño, desarrollo e implementación de un analizador de aguas de bajo coste elaborado con tecnologías abiertas.

Con los resultados obtenidos se considera que hay grandes líneas de mejora en esta cuestión. Por otra parte, se cree que el objetivo se ha superado altamente con las expectativas esperadas. Como líneas de mejora futuras se propone realizar nuevamente la prueba del sensor de temperatura con un termómetro profesional para poder definir el nivel de precisión del diseñado en el proyecto.

Por otra parte, no se recomienda la adquisición del pH-metro comercial, al tratarse de un sensor muy lento y con una durabilidad extremadamente baja. Finalmente, el sensor de turbidez ha dado muy buenos resultados en el rango 30-500NTU, siendo altamente preciso y con un tiempo de respuesta muy superior al turbidímetro profesional.

Ob.3. Diseño, desarrollo e implementación de sistema de comunicación para el almacenamiento de datos y que permita su posterior análisis de forma remota.

Se ha conseguido satisfactoriamente realizar envíos de datos en menos de un segundo, y poder activar o desactivar el emisor de luz infrarroja de forma remota. Por tanto, se da por completado el objetivo número tres referente a las comunicaciones.

Ob.4. Desarrollo de una documentación que permita la réplica del dispositivo desarrollado por cualquier persona interesada (open knowledge).

Con el actual trabajo de fin de grado acorde con la licencia Creative Commons se espera poder ser de valor para futuros proyectos.

Ob.5. Análisis de los resultados obtenidos. Definir la precisión, sensibilidad, linealidad, repetitividad y el rango, en el que es capaz de trabajar el analizador de agua.

El actual objetivo se cree que se ha completado parcialmente al haber adquirido un termómetro comercial con una muy baja precisión, lo que ha hecho imposible poder definir dichos parámetros.

Ob.6. Definir de forma detallada las limitaciones que se han tenido durante el proceso para fomentar una continuación de este en un futuro.

Se han detallado en el actual apartado las limitaciones de cada sensor y del proyecto en general, mencionando posibles puntos de mejora de cada sensor como en el apartado de las comunicaciones.

Finalmente se concluye que, el actual proyecto ha servido a título personal para el aprendizaje en muchos aspectos tanto técnicos como sociales. Se cree que se ha realizado un proyecto de gran magnitud incluyendo áreas de química o telecomunicaciones sobre las que se ha ido aprendiendo de forma paralela a la realización del mismo.

8 - BIBLIOGRAFÍA

- [1] Presidente de la República de el Salvador, «REGLAMENTO SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA, EL CONTROL DE VERTIDOS Y LAS ZONAS DE PROTECCION,» 16 Octubre 1987. [En línea]. Available: <http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/leyes/Decreto%20No.50.pdf>. [Último acceso: 22 Noviembre 2019].
- [2] A. P. Laguarda, «Control y supervisión mediante un sistema microcontrolador de los parámetros de calidad de un estanque,» Sevilla, España, 2017.
- [3] Yellow Brick, «Smart Fertilizer,» [En línea]. Available: <https://www.smart-fertilizer.com/es/articulos/pH-alkalinity>. [Último acceso: 01 12 2019].
- [4] R. A. C. M. M. C. G. L. Marcó, «La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadoras a partir de fuentes superficiales,» Concepción del Uruguay, Argentina, 2004.
- [5] Lenntech, «lenntech.es,» [En línea]. Available: <https://www.lenntech.es/turbidez.htm>. [Último acceso: 01 12 2019].
- [6] L. E., «Ocurrence of Nematodes in surface water use in a Drinking Water plant,» J. Water SRT - Agua - vol 43 pp 107-112, 1994.
- [7] P. L. J. y. M. L. A., «Estudio sanitario del agua,» Universidad de Granada, Granada, 1999.
- [8] Notscott, «Wikipedia,» Febrero 2007. [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Divisi%C3%B3n_administrativa_de_El_Salvador.svg.
- [9] Gobierno de El Salvador, «Ministerio de Salud,» [En línea]. Available: <https://www.salud.gob.sv/demografia/>. [Último acceso: 13 12 2019].
- [10] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, «PNUD El Salvador,» [En línea]. Available: https://www.sv.undp.org/content/el_salvador/es/home.html. [Último acceso: 13 12 2019].
- [11] «Climate-data.org,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/america-del-norte/republica-de-el-salvador/departamento-de-san-salvador/san-salvador-1889/#temperature-graph>. [Último acceso: 11 12 2019].
- [12] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, «Estrategia Nacional de Recursos Hídricos,» San Salvador, El Salvador, 2013.

- [13] D. L.-. M. L. S. y. R. D. Cristhian Román-Herrera, «Construcción con tecnología abierta de un sensor de turbidez de bajo costo,» Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolpuí, Ecuador, 2015.
- [14] A. K. L. B. A. B. D. K. W. P. y. M. W.-S. Christopher D.Kelley, «An Affordable Open-Source Turbidimeter,» Sensors, Ithaca, USA, 2014.
- [15] L. G. O. Echevarria, «Ur grisen tratamendurako biojardineraren modelakuntza eta simulazioa,» ZTF-FCT, Leioa, 2018.
- [16] Generalitat Valenciana, «www.cma.gva.es,» [En línea]. Available: http://www.cma.gva.es/areas/educacion/educacion_ambiental/educ/publicaciones/ciclo_del_agua/cicag/2/2_5_1/main.html. [Último acceso: 22 12 2019].
- [17] Hanna Instruments, «Hanna Instruments Blog,» [En línea]. Available: <https://www.hannacolombia.com/blog/post/39/la-temperatura-afecta-el-ph-del-agua>. [Último acceso: 22 12 2019].
- [18] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, «Informe de calidad del agua de los ríos de El Salvador,» San Salvador, El Salvador, 2017.
- [19] Parlamento Europeo y El Consejo, «Directiva 98/83/CE del consejo,» 1998.
- [20] Organización Mundial de la Salud, «Guías para la calidad del agua potable,» OMS, Ginebra, Suiza, 2006.
- [21] L. Llamas, «Luis Llamas,» 27 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-wifi-esp8266-esp01/>. [Último acceso: 29 09 2019].
- [22] IndiaMART, «<https://www.indiamart.com/proddetail/lora-ra-02-wifi-module-21061282855.html>,» [En línea].
- [23] Naylamp Mechatronics SAC, «Naylamp Mechatronics,» [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/inalambrico/115-modulo-gsm-sim800l.html>.
- [24] LakeShore, «PT-100 Platinum RTDs,» Lake Shore, Westerville OH.
- [25] Analog Devices, «Instrumentation Amplifier AD620,» One Technology Way, Norwood,EEUU.
- [26] DF Robot, «PH meter».
- [27] Quercuslab.es, «El blog de Quercuslab,» 05 06 2018. [En línea]. Available: <https://quercuslab.es/blog/efectos-de-la-temperatura-en-la-medida-del-ph/>. [Último acceso: 09 01 2020].

- [28] Donblair, «Public Lab,» 25 08 2016. [En línea]. Available: <https://publiclab.org/system/images/photos/000/011/273/original/turbidity.png>. [Último acceso: 18 01 2020].
- [29] Texas Instruments, «OPT101 Monolithic Photodiode and Single-Supply Transimpedance Amplifier,» 2015.
- [30] Arduino, «Arduino,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/TFT>. [Último acceso: 07 02 2020].
- [31] L. Llamas, «Luis Llamas,» 14 05 2016. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-spi/>. [Último acceso: 07 02 2020].
- [32] L. Llamas, «Luis Llamas,» 22 05 2016. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-lcd-i2c/>. [Último acceso: 08 02 2020].
- [33] L. Valle, «Programarfacil.com,» [En línea]. Available: <https://programarfacil.com/blog/utilizar-pulsadores-en-arduino/>. [Último acceso: 08 02 2020].
- [34] Tema 2: Funciones disponibles en las subestaciones, Alta especificidad.
- [35] Sare tipologiak, [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/b7f148ca3e552dddc1257aca003530c4/CT13-Comunicacion%20via%20bus%20con%20los%20interruptores%20ABB_ES-OK.pdf.
- [36] SIPCO mailak, [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/109277440/Lucia-Saray-Barrantes-Pinela-memoria-Pfc>.
- [37] TCP/IP protokoloak, [Online]. Available: <http://es.ccm.net/contents/282-tcp-ip>.
- [38] DNP 3.0 protokoloak, [Online]. Available: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=804>.
- [39] Zuntz optikoa, [Online]. Available: <https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/486a07817e45c.pdf>.
- [40] Azpiestazioaren arkitektura, [Online]. Available: <https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/486a07817e45c.pdf>.
- [41] Azpiestazioaren arkitektura, [Online]. Available: <https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/486a07817e45c.pdf>.

- [42] Campus Iberdrola, «Introducción a los sistemas de control y protección local (SCL) de las CC.HH. de Iberdrola,» San Agustín de Guadalix-Madrid.
- [43] U. S. E. P. Agency, «<https://www.epa.gov/>,» [En línea].