



**Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Tucumán  
Dirección de Posgrado**

**Especialización en Ingeniería Ambiental**

***Diseño de un dispositivo electrónico de medición  
multiparamétrico de variables ambientales para  
analizar la calidad del agua***

**Ing. Rubén Darío Egea**

Trabajo Final Integrador para optar al Grado Académico Superior de  
Especialista en Ingeniería Ambiental

Tutor: Mg. Ing. Juan Carlos Colombo

San Miguel de Tucumán  
Noviembre 2018

***Dedicatorias:***

*Dedicado a la memoria de mis padres Paco y Mari por su amor y sacrificio.  
A mi esposa Lorena, mis hijos Augusto y Máximo quienes son el motor que impulsa  
mi vida*

***Agradecimientos:***

*A Dios, quien guía todos mis pasos.  
Al Director de la especialización Oscar Graieb, por su acompañamiento y su fuerza  
inagotable.  
A mi tutor Juan Carlos Colombo por sus valiosos aportes y su inmensa generosidad.*

*Muchas gracias*

## **Prólogo**

*Desde el comienzo del cursado de la Especialización en Ingeniería Ambiental en la FRT-UTN surgió en mi la inquietud de relacionar mi área de formación disciplinar (soy Ingeniero electrónico), con la temática ambiental, a fin de poder contribuir positivamente en la búsqueda de soluciones a las distintas problemáticas que allí se presentan.*

*En ese sentido este Trabajo Final representa un aporte concreto, ya que haciendo uso de tecnologías actualizadas disponibles, se propone el diseño de un dispositivo electrónico de medición, multiparamétrico, de variables ambientales que permiten analizar la calidad del agua. Este dispositivo cuenta además con posibilidades de almacenamiento y comunicación a una estación remota de monitoreo y control lo cual representa una mejora considerable a los equipos de medición utilizados en la actualidad.*

*Rubén Darío Egea*

## INDICE

|  |         |
|--|---------|
| <b>Resumen</b> .....   | pág. 6. |
| <b>Capítulo 1: Introducción</b> .....  | pág.7   |
| 1.1 Objetivo General   |         |
| 1.2 Objetivos específicos  |         |
| <b>Capítulo 2: Diseño de un sistema de medición de calidad de calidad del agua</b> ..... | pág.8   |
| 2.1 Elemento de detección primaria- sensor / Acondicionamiento de señales.....           | pág.11  |
| 2.2 Conversión de Señales.....   | pág.11  |
| 2.3 Procesamiento de la señal.....   | pág.11  |
| 2.4 Elementos de comunicación, de datos e información.....                               | pág.12  |
| 2.5 Visualización o presentación de datos e información.....                             | pág.12  |
| <b>Capítulo 3: Medición de las variables ambientales en agua</b> .....                   | pág.13  |
| 3.1 Conversión de señales físicas.....   | pág.13  |
| 3.1.2 Medición de temperatura.....   | pág.14  |
| 3.1.3 Diseño de un esquema de sensado de temperatura.....                                | pág.15  |
| 3.2 Medición de conductividad en soluciones acuosas .....                                | pág.19  |
| 3.2.1 Principio de medición de conductividad.....  | pág.19  |
| 3.2.2 Utilización de sensores de conductividad en diferentes soluciones.....             | pág.21  |
| 3.2.3 Utilización de sensor de conductividad con otros tipos de sensores.....            | pág.21  |
| 3.2.4 Unidades de medidas de conductividad según el líquido acuoso.....                  | pág.21  |
| 3.2.5 Diseño de un dispositivo de medición de conductividad en soluciones acuosas.....   | pág.22  |
| 3.2.6 Sensor de Conductividad.....   | pág.22  |
| 3.3 Medición de Oxígeno Disuelto.....  | pág.25  |
| 3.3.1 Principio de medición de Oxígeno Disuelto.....                                     | pág.25  |
| 3.3.2 Preparado de la prueba.....  | pág.25  |
| 3.3.3 Diagrama de conexiónado del esquema de medición.....                               | pág.27  |
| 3.3.4 Diseño de un dispositivo electrónico de medición de Oxígeno Disuelto.....          | pág.28  |
| 3.4 Medición de pH.....  | pág.28  |
| 3.4.1 Indicadores de pH.....   | pág.29  |
| 3.4.2 Papel de tornasol.....   | pág.29  |
| 3.4.3 Sonda de vidrio de pH.....   | pág.29  |
| 3.4.4 Acondicionamiento de señal analógica del sensor.....                               | pág.30  |
| 3.5 Conversión Analógico/Digital (ADC).....  | pág.30  |
| 3.6 Transceptor.....   | pág.32  |
| 3.6.1 Frecuencia de operación.....   | pág.33  |
| 3.6.2 Rango de distancia máxima.....   | pág.33  |
| 3.6.3 Velocidad de datos.....  | pág.33  |
| 3.6.4 Consumo de energía del Transceptor.....  | pág.33  |
| 3.6.5 Licencias.....   | pág.34  |

|  |               |
|--|---------------|
| 3.7 Procesador (Microcontrolador-Microprocesador).....   | pág.34        |
| 3.8 Soluciones de diseño de hardware.....  | pág.35        |
| 3.8.1 Amplificador de entrada.....   | pág.35        |
| 3.8.2 Conversor Analógico a Digital (ADC).....   | pág.36        |
| 3.8.3 Elección del Microcontrolador y Transceptor de RF.....   | pág.36        |
| 3.9 Presentación de diseño de diferentes dispositivos electrónicos para medir pH.....  | pág.37        |
| 3.10.1 Medición de turbidez.....   | pág.40        |
| 3.10.2 Teoría de la dispersión de la luz en medición de turbidez.....  | pág.41        |
| 3.10.3 Fuente de luz.....  | pág.43        |
| 3.10.4 Detectores.....   | pág.43        |
| 3.10.5 Geometría óptica.....   | pág.43        |
| 3.10.6 Diseño de un medidor de turbidez.....   | pág.44        |
| 3.10.7 Medición de turbidez.....   | pág.45        |
| 3.10.8 Controlador de LED.....   | pág.45        |
| 3.10.9 Rechazo de luz ambiental.....   | pág.45        |
| 3.10.10 Consideraciones de alimentación y digitales.....   | pág.46        |
| 3.10.11 Estándares de medición de turbidez.....  | pág.46        |
| 3.10.12 Implementación ISO7027 No relacional.....  | pág.46        |
| <b>Capítulo 4: Diseño de un equipo de medición multiparamétrico de variables ambientales.....</b>                                    | <b>pág.48</b> |
| 4.1- Descripción del proyecto.....   | pág.48        |
| 4.2- Descripción del diseño de los dispositivos electrónicos. Tecnología de los elementos utilizados. Montaje superficial y BGA..... | pág.50        |
| 4.2.1 Unidad de medición y control.....  | pág.50        |
| 4.2.2 Unidad de recepción de datos/ e interfaz a PC.....   | pág.52        |
| 4.2.3 Diagrama general en bloque del diseño. Funcionamiento global. Operación.....   | pág.53        |
| 4.2.4 Diseño del dispositivo electrónico de medición de pH en PSoC5.....   | pág.54        |
| 4.2.5 Diseño del dispositivo de comunicación en Medición de Temperatura en PSoC5.....  | pág.54        |
| 4.2.6 Diseño de PCB general mediante Altium Designer 17.....   | pág.56        |
| <b>Capítulo 5: Desarrollo del Firmware.....</b>  | <b>pág.57</b> |
| 5.1 Diagrama de flujo del sistema informático a implementar.....   | pág.57        |
| <b>Capítulo 6: Conclusiones.....</b>   | <b>pág.59</b> |
| <b>Glosario.....</b>   | <b>pág.60</b> |
| <b>Referencias Bibliográficas.....</b>   | <b>pág.61</b> |

## Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un dispositivo electrónico de bajo costo, confiable, fácil de manipular, para medir algunos de los parámetros más significativos que determinan la calidad del agua. Estos son: temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH y turbidez. Además se plantea elaborar una base de datos con los valores obtenidos en las mediciones. Adicionalmente se diseña un sistema de comunicación para acceder en forma remota a los datos obtenidos en las mediciones realizadas en el dispositivo. Esto es de gran utilidad para poder monitorear en tiempo real los parámetros que determinan la calidad del agua de la fuente analizada y poder determinar si se ajustan sus valores a la normativa legal vigente.

**Palabras clave:** calidad del agua, pH, Oxígeno Disuelto, turbidez, conductividad, temperatura, sensor

## Introducción

El agua es un recurso natural fundamental para la vida y el desarrollo humano. Su contaminación tiene impacto directo sobre la salud de la población y de los ecosistemas. La calidad del agua depende en gran medida de la actividad económica y antrópica que se desarrolla alrededor de ella.

En la actualidad somos testigos de los importantes cambios climáticos que se están produciendo en el planeta. Se debe en gran parte a la ausencia de control de las actividades que llevan a cabo las industrias las cuales muchas veces no cumplen las reglamentaciones ambientales, ¿cómo regular la forma en que impactan sus actividades en el medio ambiente? ¿Cómo saber cuál es la calidad en que se encuentra el ambiente, ya sea agua, aire o suelo?

Además de la tecnología conocida es importante utilizar la de vanguardia para estudiar el estado del medio ambiente y optimizar el aprovechamiento de los recursos naturales. Uno de ellos: el agua, vital para toda clase de vida. La contaminación del agua que se produce a diario y el uso indebido de este recurso constituye un problema ambiental.

En los antecedentes del tema se encontró que existen equipos para sensor y registrar variables ambientales, aunque muchos de ellos son para aplicaciones a nivel industrial, cuyo costo es elevado y se limitan a medir uno o dos parámetros.

Lo que motivó la realización de este Trabajo Final es el realizar el diseño de un dispositivo útil para la sociedad que permita visualizar y evaluar la calidad del agua de manera práctica. Como así también contar con un sistema que pudiera modificarse para que fácilmente sea aplicable en la adquisición de parámetros ambientales de cualquier otro medio (aire y suelo). Con la practicidad de sólo cambiar el firmware y los elementos sensores correspondientes a cada entorno.

Se imaginó tener un dispositivo de bajo coste que fuera capaz de registrar las mediciones para armar una base de datos, de manera tal que se puedan tomar acciones correctivas, hacer seguimientos y estudios de casos.

¿Era posible desarrollar un producto práctico y fiable al alcance del usuario para evaluar calidad de agua? Evitando costosos equipos que sólo están al alcance de las industrias y que hacen inaccesible al conocimiento del mismo? La respuesta constituyó un desafío.

## Objetivo General

Diseñar un sistema de medición multiparamétrico de variables ambientales para determinar de calidad del agua con posibilidades de comunicación a una estación remota.

## Objetivos específicos

- Diseñar un dispositivo electrónico de medición de: temperatura, pH, turbidez, conductividad eléctrica y Oxígeno Disuelto del agua.
- Diseñar un Sistema de Comunicación para transmitir los valores obtenidos a una estación remota de monitoreo y control.
- Almacenar los valores obtenidos en una base de datos para su posterior análisis.

## Capítulo 2.- Diseño de un Sistema de Medición de Calidad del Agua

Un sistema de medición puede definirse como una disposición sistemática de elementos para la medición o determinación de una cantidad física desconocida, incluyendo el análisis de la instrumentación, sensores (sondas) y demás componentes electrónicos que intervienen en la medición de determinadas variables según el ámbito de pertenencia. El diseño de un esquema general de medición correspondiente a un sistema de medición de variables ambientales, sus diferentes componentes / elementos se muestran en la Figura 1) siguiente. Este esquema de medición, puede aplicarse a diferentes ámbitos, agua, aire o suelos, luego se particulariza para cada uno de los ámbitos específicos según los parámetros que correspondan.

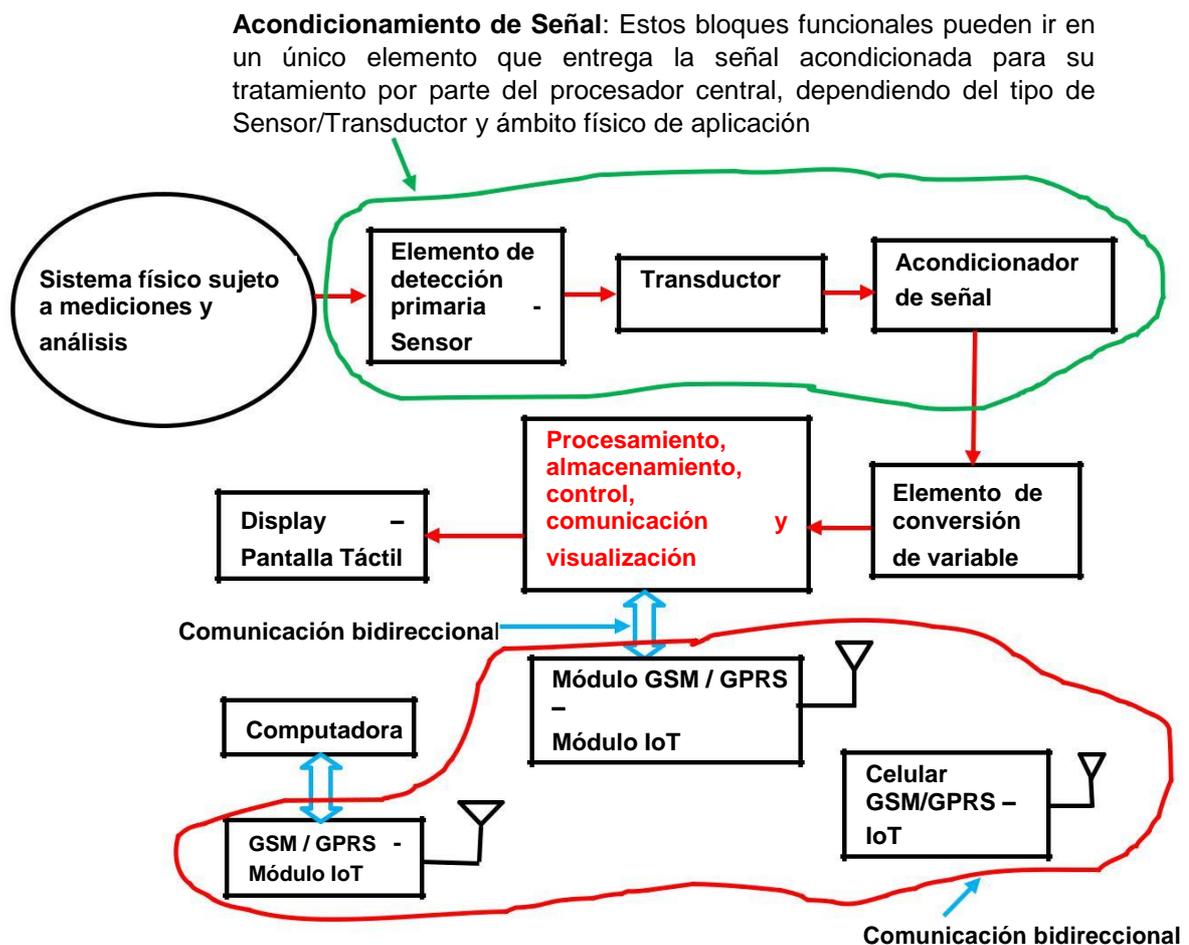


Figura 1.- Diseño de Esquema General de un Sistema de Medición

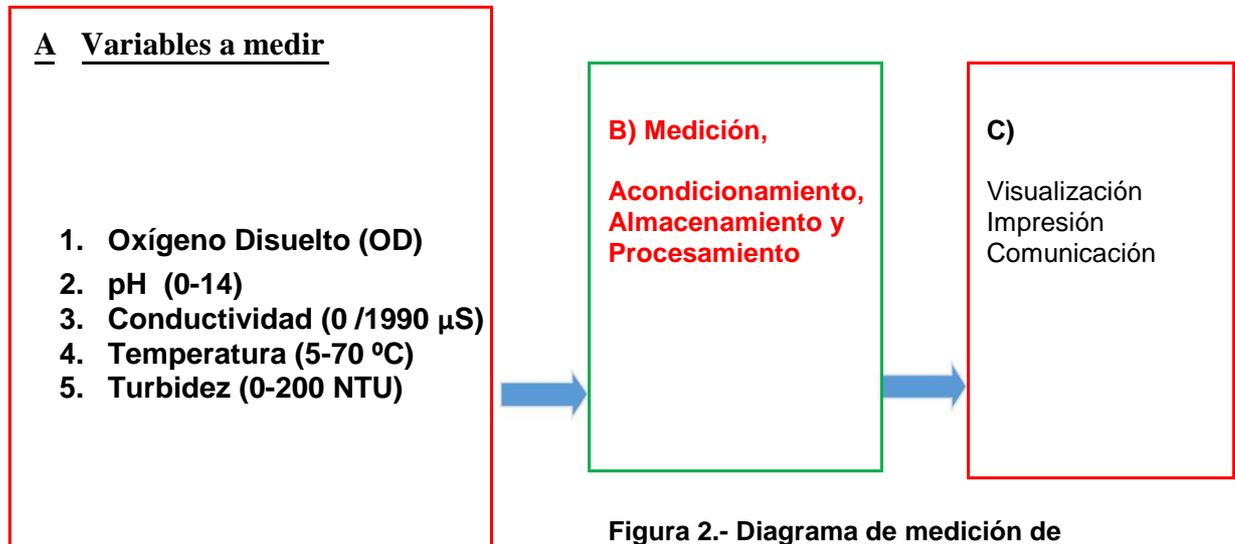
Para el caso de medición de variables que determinan la **calidad del agua**, las mediciones **son del tipo indirecta**, siempre se convierte la magnitud física real a valores analógicos y/o digitales, luego se las procesa y visualiza en un display.

Estos métodos de medición se usan en aquellos casos donde el parámetro sujeto a medición es difícil de medir directamente, pero dicho parámetro tiene alguna relación con algún otro parámetro relacionado que se puede medir fácilmente.

Por ejemplo, la eliminación de bacterias de algún fluido depende directamente de su temperatura. Por lo tanto, la eliminación de bacterias se puede medir indirectamente midiendo la temperatura del fluido, en este caso agua o de soluciones acuosas.

En los métodos indirectos de medición, **es una práctica metodológica general de diseño** establecer un análisis empírico de relación entre la cantidad medida real y el parámetro deseado o previsto, esto se presenta en el esquema general en la Figura 1) anterior.

Las partes fundamentales que intervienen en un sistema de medición específico de variables que determinan la calidad del agua se presenta en la Figura 2.



**Figura 2.- Diagrama de medición de variables en soluciones acuosas**

Como se aspira a medir diferentes variables para determinar la calidad del agua, como se indica en la Figura 2, es necesario que a cada tipo de variable que representa una magnitud física con sus propias características sea tratada de manera individual asignando un canal específico para su medición y procesamiento según se indica en la Figura 3) siguiente, dentro de un procesador. Este procesador podría ser un microprocesador o un microcontrolador según la envergadura y características del diseño a realizar.

En esta figura, también se indica la posibilidad de implementar un sistema de medición extendido a un área de aplicación que dependerá de la magnitud de la superficie a cubrir, no existiendo limitación sobre esta cuestión para utilizar el mismo dispositivo electrónico a diseñar. El resto del diagrama se corresponde con lo presentado en la Figuras 1 y 2 anteriores.

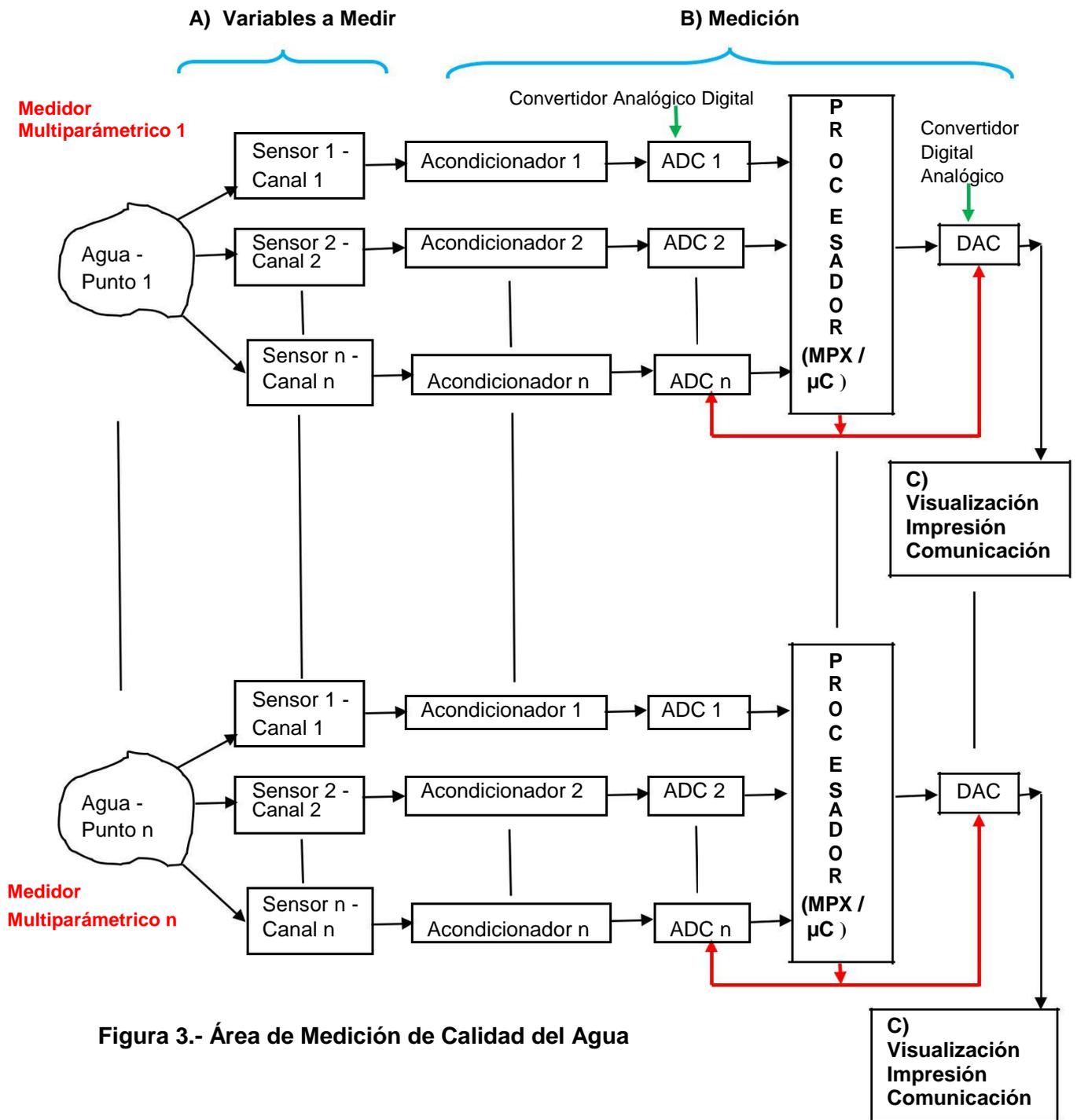


Figura 3.- Área de Medición de Calidad del Agua

La vinculación de varios puntos de medición de variables relacionadas con un mismo ámbito, con una determinada Área de Aplicación o de medición y análisis como se indica en la Figura 3), configura una red de medición. Las tecnologías de comunicación de última generación utilizadas en el diseño, hace factible cubrir grandes áreas de puntos de mediciones. El funcionamiento de un sistema de medición se puede explicar en términos de elementos funcionales del sistema. Cada instrumento y sistema de medición está compuesto por uno o más de estos elementos funcionales, y cada elemento funcional está compuesto por componentes o grupos de componentes distintos que realizan los pasos requeridos y definidos en la medición. La descripción de los diversos elementos que conforman un sistema de medición son los siguientes:

## 2.1.- Elemento de Detección Primaria- Sensor / Acondicionamiento de Señales

Es un elemento sensible a la variable medida. La cantidad física bajo medición, hace su primer contacto con el elemento sensor primario de un sistema de medición

Se debe procurar que los elementos de medición con que se diseña un sistema de medición, estén libres de perturbaciones e interferencias para que no afecten el acto de medición, de manera que el diseño de los instrumentos de medición debe minimizar estos efectos.

Los elementos de detección primaria o sensores/transductores pueden tener una entrada y salida no eléctrica, como un resorte, un manómetro o tener una entrada y salida eléctrica, con una señal variable en el tiempo o continua vía un rectificador, la cuestión está en sensar o captar los fenómenos físicos presentes en su ámbito específico. En caso de que el elemento sensor primario tenga una entrada y salida no eléctrica, luego se la convierte en una señal eléctrica por medio de un transductor. El transductor es un dispositivo que, cuando se activa por una forma de energía, es capaz de convertir a la misma en otra forma de energía.

Muchas veces, ciertas operaciones deben realizarse en la señal antes de su posterior transmisión o entrega a los restantes bloques funcionales, de modo que las fuentes interferentes se eliminen para que la señal no se distorsione. El proceso puede ser lineal, como amplificación, atenuación, integración, diferenciación, suma y resta o no lineal como modulación, detección, muestreo, filtrado, troceado y recorte, etc. **Este proceso se llama acondicionamiento de señales.**

Por lo tanto, un **acondicionador de señal** sigue al elemento de detección primario o transductor, según sea el caso. El elemento sensor detecta la condición, el estado o el valor de la variable, extrayendo una pequeña parte de la energía del elemento bajo prueba o medición, y luego produce una salida que refleja esta condición, estado o valor del elemento medido.

## 2.2.- Conversión de Señales

Después de pasar por el elemento de detección primario y acondicionamiento de la señal, la salida tiene forma de señal eléctrica, puede ser voltaje, corriente, frecuencia, que puede o no ser aceptada en el sistema. Habitualmente es necesario convertir esta salida a alguna otra forma adecuada mientras se conserva el contenido de información de la señal original.

Por ejemplo, si la salida está en forma analógica y el siguiente paso del sistema solo acepta en forma digital, se empleará un convertidor analógico a digital. Muchos instrumentos no requieren ninguna unidad de conversión variable, mientras que otros requieren más de un elemento.

## 2.3.- Procesamiento de la señal

Algunas veces es necesario cambiar el nivel de la señal sin cambiar la información contenida en ella para la aceptación por el resto del instrumento. La función de la unidad de procesamiento es manipular, analizar, operar y realizar cálculos y gráficos de

la señal que se le presenta, conservando la naturaleza original de la misma. Esta unidad central de procesamiento tiene un procesador o un microcontrolador que mediante una programación o firmware realiza las tareas indicadas a las que se pueden agregar, memorias de almacenamiento de datos e información de las mediciones efectuadas, exhibición de resultados sean estos numéricos o gráficos, y enviarlos vía un medio de comunicación ya sea a través de un modem GSM/GPRS o mediante un módulo IoT a elementos remotos como una computadora o un celular que puede trabajar con ambos medios de comunicación.

Como un ejemplo sencillo, dentro de este bloque funcional, generalmente hay un amplificador electrónico que convierte una pequeña señal de entrada de bajo voltaje en una señal de salida de voltaje elevado o de mayor nivel que la entrada. Por lo tanto, el amplificador de voltaje actúa como una unidad de manipulación o procesamiento de la variable desde su dimensionamiento físico.

#### **2.4.- Elementos de comunicación, de datos e información**

Los elementos de transmisión o de comunicación son necesarios para transmitir los datos e información del procesamiento de una señal o grupos de señales de un sistema medición a un centro remoto de control, donde está ubicada una computadora del tipo PC o a través de un celular. Un ejemplo son los satélites que están físicamente separados de la tierra donde se encuentran las estaciones de control que guían su movimiento. Actualmente se puede comunicar en forma digital y bidireccional, hacia y desde un Centro de Control y una estación de medición o grupos de estaciones remotas configurando un área de actuación ambiental vía modem GSM/GPRS o módulos IoT (Internet of Things) directamente con la nube. Los protocolos que se utilizan son del tipo TCP/IP.

#### **2.5.- Visualización o presentación de datos e información**

La función de los elementos de presentación de datos es proporcionar una indicación, visualización o exhibición de datos, resultados, gráficos y demás información de utilidad según la naturaleza de las variables bajo medición y análisis.

La información relativa a las variables sujetas a medición y procesamiento debe transmitirse en forma simple y eficiente a las personas que manejan los instrumentos o al sistema de medición con fines de monitoreo, control o análisis.

Es de uso común una pantalla táctil con presentación digital, incluida escalas calibradas y un puntero de guía, o en una pantalla de computadora cualquiera sea su tipo.

Los datos e información resultante del proceso de medición se graban en diferentes medios desde una memoria EEPROM interna, hasta medios externos como un pentdrive o disco duro de una computadora. Para fines de control y análisis de áreas de aplicación conformada por varias unidades remotas, se pueden usar computadoras, celulares o unidades de control específicas.

Las etapas de diseño de dispositivos electrónicos que miden cada una de las variables específicas relativas a la calidad del agua o soluciones acuosas y que en forma posterior serán integradas a un sistema de medición de variables ambientales se presentan a continuación, a partir del Capítulo 3 siguiente.

Es conveniente tener como referencia inicial el contenido de las Figuras 1), 2 y 3) anteriores.

### **Capítulo 3.- Medición de Variables Ambientales en Agua**

Los sensores electrónicos son elementos de detección y medición de variables en diferentes ámbitos de aplicación, posibilitando que los eventos físicos que ocurren en el mundo real pueden ser medidos, almacenados, procesados y visualizados con fines de análisis e investigación suministrando datos e información a las ciencias naturales en beneficio de la sociedad, de las actividades productivas y de servicios, del medio ambiente y la salud de la personas, entre otros beneficios. Hay una diversidad importante de sensores que detectan y miden diferentes tipos de variables que representan fenómenos físicos y sus efectos, desde la luz, pasando por el monóxido de carbono, las ondas de sonido, y el impacto ambiental.

El principio general de los sensores, es que miden cantidades del mundo real, que luego se convierten en una señal eléctrica para su procesamiento, almacenamiento y visualización por diferentes dispositivos electrónicos.

Los sensores a veces se denominan transductores y en este caso se refieren a cualquier elemento que convierta una señal del mundo físico, real o analógico a una señal eléctrica en condiciones de ser procesada y almacenada por dispositivos electrónicos en forma digital, a lo cual se agrega capacidad de comunicación in situ cuando se forman redes de sensores que cubren una determinada área de aplicación y/o comunicación a distancia o remota, hacia y desde un centro de control, o mediante un teléfono celular.

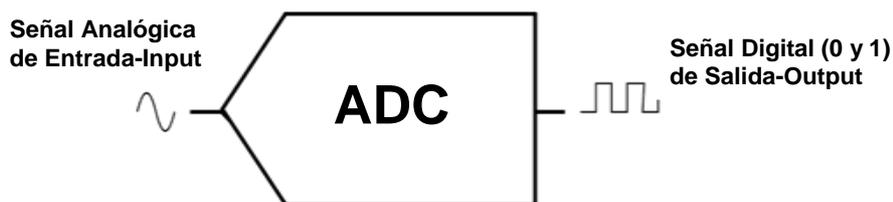
Existe una gran variedad de sensores según el ámbito de aplicación, y en este caso se limita a sensores/transductores que tengan una directa vinculación con la calidad del agua, no hay limitaciones para cambiar el tipo de sensores manteniendo el diseño de los dispositivos electrónicos originales los cuales son de utilidad para diferentes lugares de aplicación, previa adecuación del correspondiente firmware a los parámetros particulares de cada ámbito sean agua, aire o suelo.

Para el caso específico del sistema de medición multiparamétrico a diseñar, el ámbito de aplicación es el agua, y los parámetros físicos a medir son: **temperatura, Oxígeno Disuelto, Conductividad, pH y turbidez.**

#### **3.1.- Conversión de Señales Físicas**

Hay diferentes formas de clasificar los sensores, una de las formas habituales es la conversión de señales físicas a señales analógicas V/I (voltaje / corriente, mV/ mA, como es el caso de un sonido. Los sensores de sonido, más conocidos como micrófonos, convierten las variaciones de presión del aire de una onda de sonido en una señal eléctrica. Obtenida esta señal se pasa a señal digital, luego se procesa, almacena, visualiza y comunica externamente por diferentes medios de comunicación.

Otra manera de clasificar es analógica versus digital, la diferencia entre los sensores analógicos y digitales se relaciona con la forma en la que el sensor genera los datos captados en campo en un ámbito físico particular. Muchos sensores proporcionan un voltaje a su salida que varía proporcionalmente con la cantidad física que se mide a la entrada. Este voltaje es una señal analógica que varía continuamente entre dos umbrales de voltaje, incluyendo el cruce por cero, como se indica en la Figura 4 siguiente.



**Figura 4 - Un Convertidor Analógico a Digital (ADC) toma una señal analógica a la entrada y emite una señal digital a la salida.**

Cuando una señal analógica se introduce a un convertidor analógico a digital (ADC), Figura 4, se convertirá en una señal digital. Si este ADC está integrado en el sensor, entonces se dice que el sensor es digital, la señal puede entrar al dispositivo de procesamiento a través de alguna entrada digital disponible. Si el ADC se encuentra en algún lugar fuera del sensor, dentro del microcontrolador del sistema o en un chip ADC específico, entonces el sensor es analógico, y se procede a su tratamiento para su conversión al ámbito digital.

Los sensores digitales generalmente son preferibles si el precio y especificaciones son aceptables en función de la aplicación a desarrollar. Esto se debe a que los sensores digitales ya tienen incorporados el tratamiento electrónico contra interferencias eléctricas o ruidos, y en consecuencia disminuyen el riesgo sobre el diseño de dispositivos electrónicos y su posterior construcción.

### **3.1.2- Medición de temperatura**

En relación con el sistema de medición a diseñar, una de las variables a medir es la temperatura en agua.

Los sensores de temperatura son el tipo de sensor más comúnmente utilizado. Esto se debe en parte al hecho que muchos microchips incluyen sensores de temperatura incorporados, que cortarían o interrumpirán su funcionamiento si el chip comienza a sobrecalentarse evitando su rotura.

Los tres tipos más comunes de sensores de medición de temperatura son: termistores, RTD y termopares.

Un termistor es un dispositivo hecho de un material de óxido de metal que varía su resistencia en función de la temperatura, disminuye su resistencia a medida que aumenta la temperatura. Debido a este efecto inverso, los termistores también se conocen como sensor de coeficiente de temperatura negativa (NTC). Por el contrario los sensores PTC, con coeficiente de temperatura positiva, son resistores no lineales cuya resistencia aumenta con la temperatura.

La principal ventaja de los termistores es que son baratos y fáciles de usar. La desventaja crítica de los termistores es que no son muy lineales. Esta no linealidad limita el rango de temperatura en el que pueden usarse con precisión, aunque siempre hay que elegir el rango lineal de trabajo. Sin embargo, a menos que requiera una precisión extremadamente alta o mediciones superiores a cientos de grados, entonces los termistores son probablemente la mejor opción para un producto.

Los otros tipos de sensores de temperatura, como los detectores de temperatura de resistencia (RTD) y los termopares se utilizan principalmente en aplicaciones

industriales donde la precisión y la capacidad de medir temperaturas muy altas son más críticas. Los RTD son los sensores de temperatura más precisos, pero también lo más costosos. Los termopares se utilizan principalmente en aplicaciones industriales superiores a los 600 ° C.

### 3.1.3- Diseño de un esquema de sensado de temperatura

El termistor NK302C1R3 de Amphenol Advanced Sensors es un NTC <sup>[1]</sup> con un rango de medición de temperatura de -40°C a 155°C con resistencia variable de 3KΩ a 25°C. El NTCC200E4 de Vishay BCcomponents, también es un NTC con un rango de temperatura de -55°C a 175°C con resistencia variable de 4.7KΩ a 25°C, son dos casos de componentes que debidamente encapsulados en acero inoxidable se puede utilizar para medir temperatura en agua según los rangos mencionados, ambos tienen control y compensación de temperatura de trabajo interno.



Figura 2.- Termistor NTC NK302C1R3 <sup>[2]</sup>

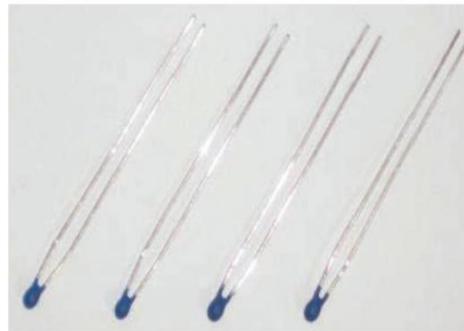


Figura 3.- Termistor NTCC200E4 <sup>[3]</sup>



Figura 4.- Termistor NTCG064BF473FTBX - Chip NTC thermistors of NTCG series <sup>[5]</sup>

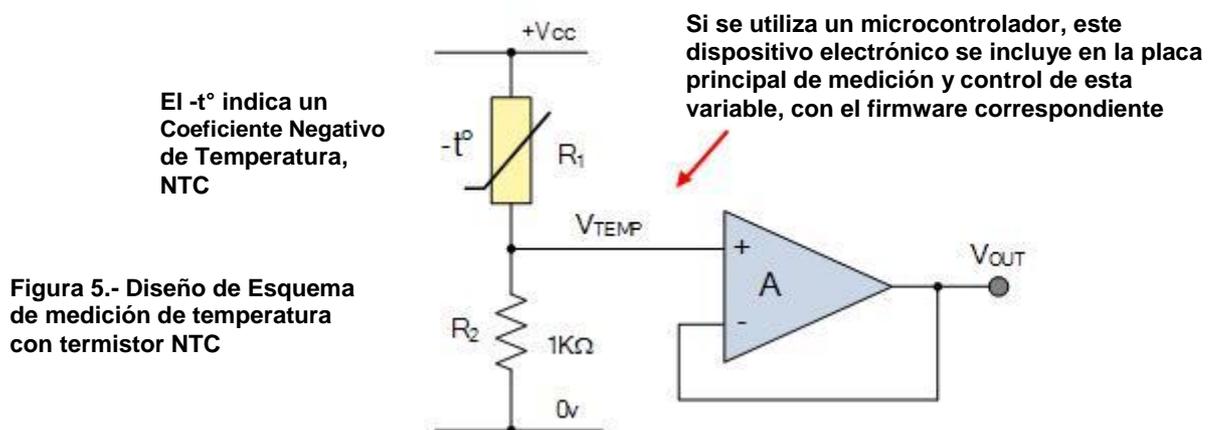
Cualquiera sea el tipo de termistor a utilizar NTC o PTC <sup>[4]</sup> es un elemento o componente que cambia su resistencia física cuando se expone a cambios de temperatura, dichos cambios se asocian a cambios de voltajes y corrientes. Esa propiedad es la que se utiliza para diseñar dispositivos electrónicos, para medir temperatura e incluso cuando se utilizan para protección de dispositivos electrónicos contra sobretensiones elevadas. Los termistores se construyen a partir de un material semiconductor de tipo cerámico utilizando tecnología de óxido metálico como manganeso, cobalto y níquel, etc. El material semiconductor generalmente se forma en pequeños discos o bolas prensados herméticamente sellados para dar una respuesta relativamente rápida a cualquier cambio de temperatura.

Los termistores se clasifican por su valor resistivo a temperatura ambiente (generalmente a 25°C), su tiempo de respuesta para reaccionar al cambio de temperatura y su potencia nominal con respecto a la corriente que fluye a través de ellos. Al igual que las resistencias, los termistores están disponibles con valores de

resistencia a temperatura ambiente de  $M\Omega$  a solo unos pocos ohmios, pero para fines de detección, generalmente se usan con valores en kilo-ohmios.

Como los termistores son elementos resistivos pasivos, debe pasar una corriente a través de ellos para producir una salida de voltaje medible. Por esta razón, habitualmente los termistores se conectan en serie con una resistencia de polarización adecuada para formar una red divisora de potencial y la elección de la resistencia proporciona una salida de tensión en un punto o valor de temperatura predeterminado. A título de ejemplo se presenta el caso siguiente.

Si un termistor tiene un valor de resistencia de  $10\text{ k}\Omega$  a  $25\text{ }^\circ\text{C}$  y un valor de resistencia de  $100\Omega$  a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , se calcula la caída de voltaje en el termistor y, por lo tanto, su voltaje de salida ( $V_{out}$ ) para ambas temperaturas cuando se conecta en serie con una resistencia de  $1\text{ k}\Omega$  a través de una fuente de alimentación de  $12\text{V}$ , según el esquema de la Figura 4.



a  $25\text{ }^\circ\text{C}$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{cc} = \frac{1000}{10000 + 1000} \times 12\text{ V} = 1.09\text{ V}$$

a  $100\text{ }^\circ\text{C}$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{cc} = \frac{1000}{100 + 1000} \times 12\text{ V} = 1.09\text{ V}$$

Si se cambia el valor del resistor fijo  $R_2$ , de  $1\text{ k}\Omega$  para este ejemplo, a un potenciómetro o preajuste, se puede obtener una salida de voltaje en un punto de ajuste de temperatura predeterminado, por ejemplo, salida de  $5\text{V}$  a  $60\text{ }^\circ\text{C}$  y variando el potenciómetro un nivel de voltaje de salida particular puede obtenerse un rango de temperatura más amplio.

No obstante, debe tenerse en cuenta que los termistores son dispositivos no lineales y sus valores de resistencia estándar a temperatura ambiente son diferentes entre los diferentes termistores, lo que se debe principalmente a los materiales semiconductores de los que están hechos. El Termistor tiene un cambio exponencial con la temperatura y, por lo tanto, tiene una constante de temperatura Beta ( $\beta$ ) que se puede usar para calcular su resistencia para cualquier punto de temperatura dado.

Sin embargo, cuando se utiliza con una resistencia en serie, como en una red divisoria de voltaje o una disposición de tipo puente de Wheatstone, la corriente obtenida en respuesta a un voltaje aplicado a la red divisoria / puente es lineal con la temperatura. Entonces, la tensión de salida a través de la resistencia se vuelve lineal con la temperatura. El cambio en la resistencia debido al calor generalmente no es deseable en las resistencias estándar, sin embargo este efecto puede ser utilizado correctamente en muchos circuitos de detección de temperatura. De esta forma los dispositivos de resistencia variable no lineales como los termistores, se usan comúnmente como sensores de temperatura que se pueden utilizar para medir la temperatura en diferentes ámbitos, líquidos, aire y suelos.

Otra característica importante de los termistores es el valor "B". El valor B es una constante del material que está determinada por el material cerámico del que está hecho y describe el gradiente de la curva resistiva (R / T) en un rango de temperatura particular entre dos puntos de temperatura. Cada material de termistor tendrá una constante de material diferente y, por lo tanto, una curva de resistencia versus temperatura, distinta.

Entonces el valor B definirá el valor resistivo de los termistores en la primera temperatura o punto base, que generalmente es de 25 °C, llamado T1, y el valor resistivo de los termistores en un segundo punto de temperatura, por ejemplo 100 ° C, llamado T2. Por lo tanto, el valor B definirá el material del termistor constante entre el rango de T1 y T2. Eso es BT1 / T2 o B25 / 100 con valores típicos de termistor B de NTC dados en cualquier lugar entre aproximadamente 3000 y aproximadamente 5000.

Para el caso del termistor NTCC200E4 estos valores para B25/85 son de 3435 a 3865 KΩ con una tolerancia de ± 1%.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que ambos puntos de temperatura de T1 y T2 se calculan en las unidades de temperatura de Kelvin donde 0°C = 273.15 Kelvin. Por lo tanto, un valor de 25°C es igual a 25 + 273.15 = 298.15K, y 100°C es igual a 100 + 273.15 = 373.15K, y así sucesivamente.

Entonces, al conocer el valor B de un termistor particular (obtenido de la hoja de datos del fabricante), es posible producir una tabla de temperatura versus resistencia para construir un gráfico adecuado usando la siguiente ecuación normalizada:

Ecuación del termistor

$$B_{(T1/T2)} = \frac{T_2 \times T_1}{T_2 - T_1} \times \ln \left( \frac{R_1}{R_2 (R_x)} \right) \quad (1)$$

Dónde:

- T1 es el primer punto de temperatura en Kelvin
- T2 es el segundo punto de temperatura en Kelvin
- R1 es la resistencia de los termistores a la temperatura T1 en ohmios
- R2 es la resistencia de los termistores a la temperatura T2 en ohmios. Se convierte en la Rx a determinar.

## Determinación de $R_x$ y la curva de $R/T$

Si un termistor NTC de  $10\text{k}\Omega$  tiene un valor  $B$  de  $3455$  entre el rango de temperatura de  $25^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$ , se calcula su valor resistivo a  $25^\circ\text{C}$  y a  $100^\circ\text{C}$ .

Para convertir la escala de temperatura de grados Celsius,  $^\circ\text{C}$  a grados Kelvin, se agrega la constante matemática  $273.15$

El valor de  $R_1$  ya se da como su resistencia de base de  $10\text{ k}\Omega$ , por lo tanto, el valor de  $R_2 (=R_x)$  en  $100^\circ\text{C}$  se calcula como:

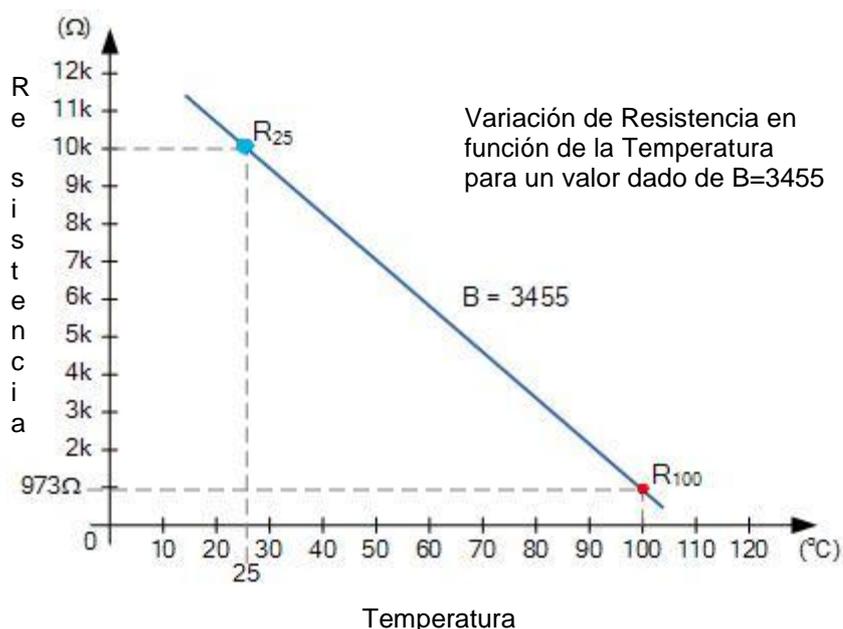
$$B_{(25/100)} = \frac{(100+273.15) \times (25+273.15)}{(100+273.15) - (25+273.15)} \times \ln \left( \frac{10000}{R_x} \right)$$

$$3455 = \frac{111254.6725}{75} \times \ln \left( \frac{10000}{R_x} \right) = 1483.4 \times \ln \left( \frac{10000}{R_x} \right)$$

$$e \quad \frac{3455}{1483.4} = \frac{10000}{R_x} \quad \longrightarrow \quad R_x = \frac{10000}{\frac{3455}{1483.4}} = 973\Omega$$

e<sup>2.33</sup>

Resulta el siguiente gráfico entre dos puntos característicos a  $25^\circ\text{C}$  y  $100^\circ\text{C}$



**Figura 6.- Gráfico de Resistencia – Temperatura de un Termistor NTC**

Para el caso de la Figura 6, solo se encontraron dos puntos, pero como generalmente los termistores cambian su resistencia exponencialmente con cambios de temperatura, su curva característica no es lineal, por lo tanto, cuantos más puntos de temperatura se calculen, más precisa será la curva de relación  $R/T$ .

## 3.2- Medición de Conductividad en Soluciones Acuosas

### 3.2.1.- Principio de Medición de Conductividad

Un sensor de conductividad mide la capacidad para conducir la electricidad en soluciones de agua o soluciones acuosas, con el objetivo de aportar información para la evaluación de la calidad del agua utilizada en consumo, cultivos, agua ambiental y en diferentes campos relacionados con industrias y servicios. Cuando las sales y otros productos inorgánicos se disuelven en agua, se separan en iones con carga eléctrica. Los iones aumentan la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica. **Los iones comunes en agua que mejor conducen la corriente eléctrica son: sodio, cloruro, calcio, y magnesio.** Los compuestos orgánicos, tales como **azúcares, aceites y alcoholes, no forman iones.**

Debido a que la conductividad es la recíproca de la resistencia, está relacionada con la capacidad de un material para transportar la corriente eléctrica. De manera que, en un líquido acuoso, el recíproco de la resistencia, la conductividad, es la medida de su capacidad para conducir la electricidad en este medio.

El principio por el cual el sensor mide la conductividad consiste en que dos placas de grafito (celdas) se colocan en la muestra, se aplica un potencial a través de las placas y se mide la corriente entre ellas. El sensor de conductividad mide la conductancia de la solución, lo inverso a la resistividad  $R$ , a partir de la tensión y los valores actuales de acuerdo con la ley de Ohm :  $G=1/R=I/V$ .

Teniendo presente que la Conductancia  $G$ , es la inversa de la Resistencia  $R$ , o la relación entre la corriente ( $I$ ) que circula entre las celdas a una diferencia de potencial o voltaje aplicada a las mismas ( $V$ ).

En relación con la **Figura 7)** siguiente, se encuentra el chip U3B, el cual es un inversor. La función de transferencia es  $V_o = R_{10} / R * V_i$ , donde  $R_{10}$  es una resistencia de retroalimentación y su valor es de  $820\Omega$  al 1%.  $R=R_x$  es la resistencia cuando el electrodo se inserta en solución acuosa. Su valor está relacionado con la conductividad de la solución acuosa. La relación  $R_{10} / R$  varía en función de la solución acuosa del medio donde se realiza la medición. De manera que cuando se cambia  $R$ , la relación cambia, por lo que el  $V_o$  también cambia. Así que,  $V_o$  está relacionado en forma inversamente proporcional a  $R$ , si  $R$  aumenta  $V_o$  disminuye y si  $R$  disminuye  $V_o$  aumenta. A la derecha del circuito escalado inverso, hay un circuito de valor absoluto. Su función de transferencia es  $V_o = |v_i|$ . La salida del circuito de valor absoluto se utiliza para calcular la conductividad.

A continuación se analiza el principio de medición, también utilizado durante la calibración.

La resistencia es  $R=R_x$  es :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1)$$

$\rho$  es la resistividad; L es la longitud del elemento resistor; S es la sección transversal de una resistencia.

Para el electrodo de conductividad, L es el espacio entre dos láminas conductoras, S es el área de la lámina conductora. De manera que definida una solución acuosa se dispone del  $\rho$ , como se indica en el Punto 2) siguiente, para diferentes líquidos acuosos

$$K = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Si en (1) se reemplaza  $\rho$  por (2), resulta que

$$K = \frac{1}{R} \times \frac{L}{S} \quad (3)$$

De acuerdo con las ecuaciones anteriores, podemos obtener la ecuación (4):  $1 / R$  se llama conducción G.  $L / S$  se llama constante del recipiente Q.

$$V_{out} = \frac{R_{10}}{R} \times |V_{in}| \quad (4)$$

La función de transferencia del circuito de medición es la ecuación (4), donde R es la resistencia del electrodo cuando se inserta en una solución acuosa. En conclusión, podemos obtener la ecuación (5) siguiente:

$$K = \frac{Q}{R_{10} \times |V_{in}|} \times V_{out} \quad (5)$$

Q es la constante el recipiente, K es una constante y difiere de cada electrodo. En el esquema electrónico de la Figura 7), R10 es 820 $\Omega$ .

|  $V_{in}$  | también es una constante que depende del circuito de generación de señal. Su valor es de aproximadamente 200 mV. Entonces se concluye que la conductividad en un líquido acuoso es lineal con el voltaje de salida.

Para evitar la migración de iones de los dos electrodos o lámina en paralelo, el sensor utiliza corriente alterna como se indica en el esquema electrónico de la Figura 7) siguiente. Con cada ciclo de corriente alterna la polaridad de los electrodos se invierte. Esto evita la electrólisis y la polarización de la solución acuosa.

### **3.2.2- Utilización de sensores de conductividad en diferentes soluciones**

No colocar los electrodos en líquidos orgánicos como aceites pesados, glicerina o etilenglicol, acetonas o disolventes pesados como pentano o hexano

### **3.2.3.- Utilización de sensor de conductividad con otros tipos de sensores**

Es importante saber si el sensor de conductividad interactúa con otros tipos de sensores, si se colocan en la misma solución y están conectados a la misma interface de medición. El sensor de conductividad emite una señal en la solución, y esta señal puede afectar a la lectura de otros sensores. De manera que los siguientes sensores no pueden ser conectados a la misma interface cuando se colocan en la misma solución: sensor de Oxígeno Disuelto, sensor de pH y sensor de salinidad.

Otros sensores se pueden conectar al mismo tiempo a la interface pero sólo uno a la vez puede ser colocado dentro de la solución para tomar las lecturas o realizar mediciones por una misma interface de medición.

Es fundamental **utilizar diferentes interfaces de medición** si se necesita utilizar simultáneamente diferentes tipos de sensores en una misma solución acuosa.

Si este es el caso, por interfaces diferentes pueden medirse simultáneamente la conductividad y el oxígeno disuelto o lecturas de conductividad y pH. Se puede agregar medición de temperatura sin ningún inconveniente, siendo habitual que los sensores de conductividad y temperatura vayan alojados en un mismo recipiente o encapsulado.

En caso de disponer de una única interface de medición, medir cada parámetro por vez.

### **3.2.4.- Unidades de medidas de conductividad según el líquido acuoso**

Como el siemens, S, es una unidad muy grande, las conductancias de muestras acuosas se miden comúnmente en  $\mu\text{S}$  y  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , según el tipo de líquido acuoso. Algunos valores de conductividad de soluciones acuosas son:

| <b>Muestra</b>                 | <b>Conductividad(<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b> |
|--------------------------------|--|
| Agua pura                      | 0.055  |
| Agua destilada                 | 0.5  |
| Agua desionizada               | 0.1 – 10   |
| Agua de lluvia                 | 20 -- 100  |
| Agua para beber                | 200  |
| Agua de río                    | 250  |
| Agua de pantano                | <b>1000 -- 8000</b>                                      |
| KCl 0.01M                      | 1410 -   |
| MgSO <sub>4</sub>              | 5810   |
| KCl 0.1M                       | 12900  |
| Agua de Océano                 | 53000  |
| H <sub>2</sub> S <sub>04</sub> | 82600  |
| KCl 1.0M                       | 112000   |

### 3.2.5.- Diseño de un dispositivo electrónico de medición de conductividad en soluciones acuosas

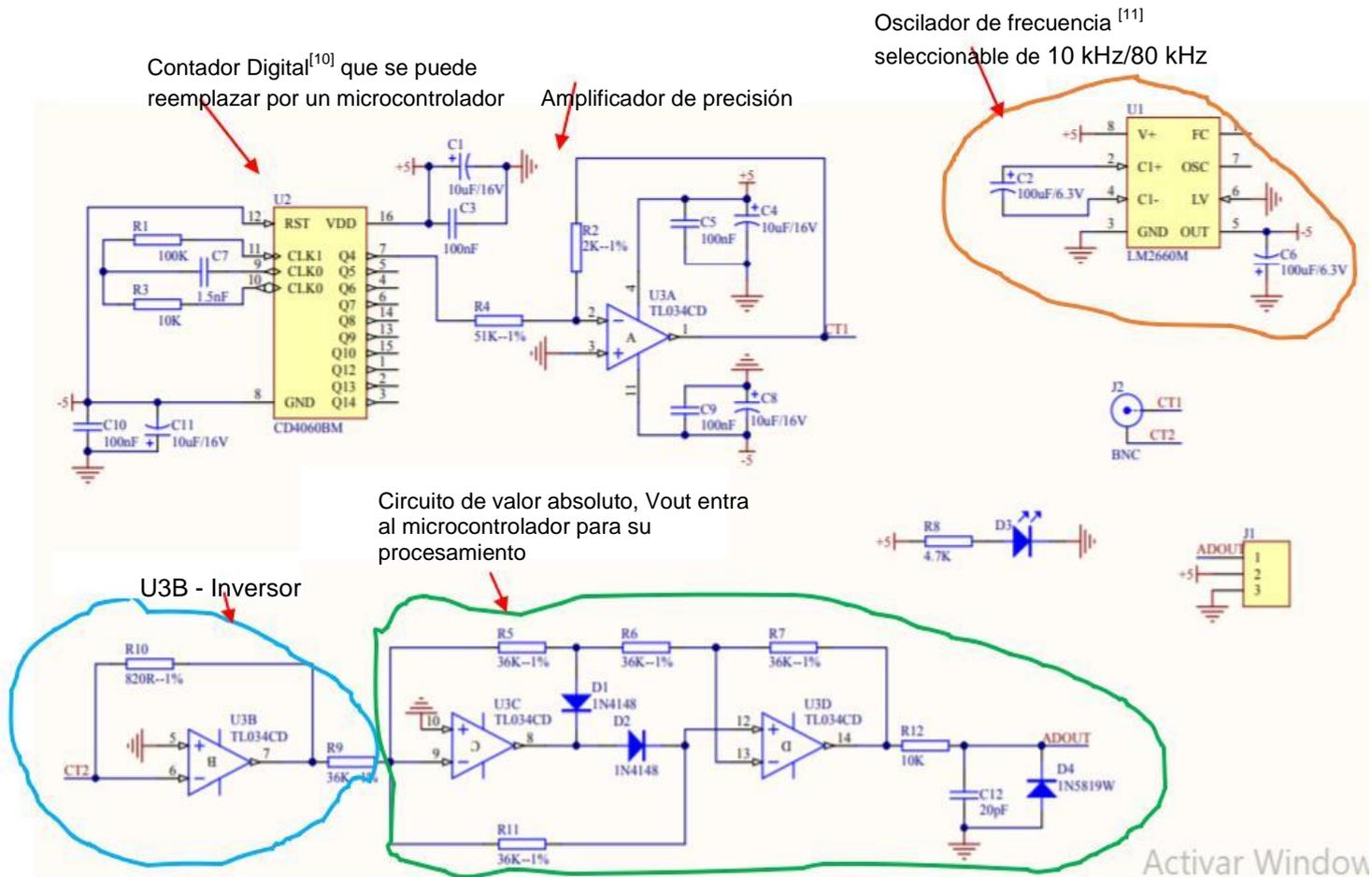


Figura 7.- Diseño de dispositivo electrónico para medir conductividad

En la figura 7 anterior, se indica la función de cada parte dentro del diseño de un dispositivo electrónico destinado a una aplicación en particular como es la **medición de conductividad en agua o en líquidos acuosos**.

Este esquema es preliminar y demostrativo del diseño de un medidor sectorial o para una variable en particular, en este caso conductividad.

Se recuerda que posteriormente se presentará el diseño de un medidor integral o de varias variables, respetando las interfaces que correspondan a cada tipo de variable ambiental a medir y analizar, convirtiéndose en un medidor multiparamétrico.

### 3.2.6.- Sensor de Conductividad

La hoja de datos del sensor de conductividad a utilizar es Conductivity Electrode de DFRobot<sup>[6]</sup>. Este electrodo de conductividad es el elemento sensor para las mediciones a realizar por un medidor de conductividad en una solución acuosa.

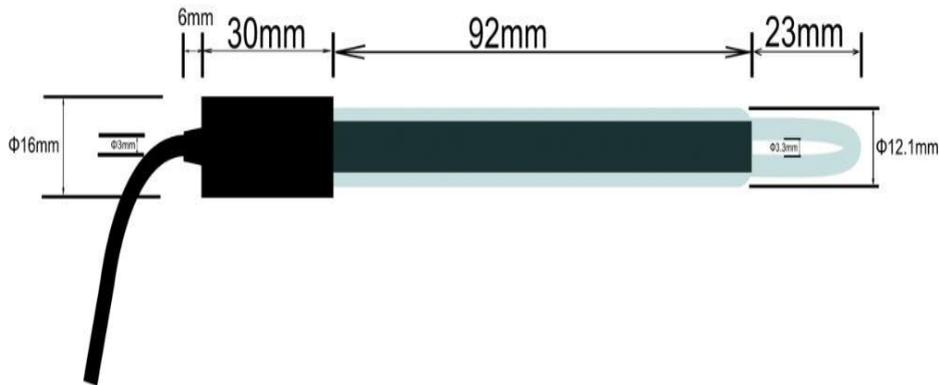
El electrodo de conductividad seleccionado tiene una constante de electrodos  $K = 1$ , con conector BNC.

En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de conductividad es Siemens / metro (S/m), y las otras unidades son: S/m, mS/cm,  $\mu$ S/cm. La relación de conversión es:  $1\text{S} / \text{m} = 1000\text{mS} / \text{m} = 1000000\mu\text{S} / \text{m} = 10\text{mS} / \text{cm} = 10000\mu\text{S} / \text{cm}$ .

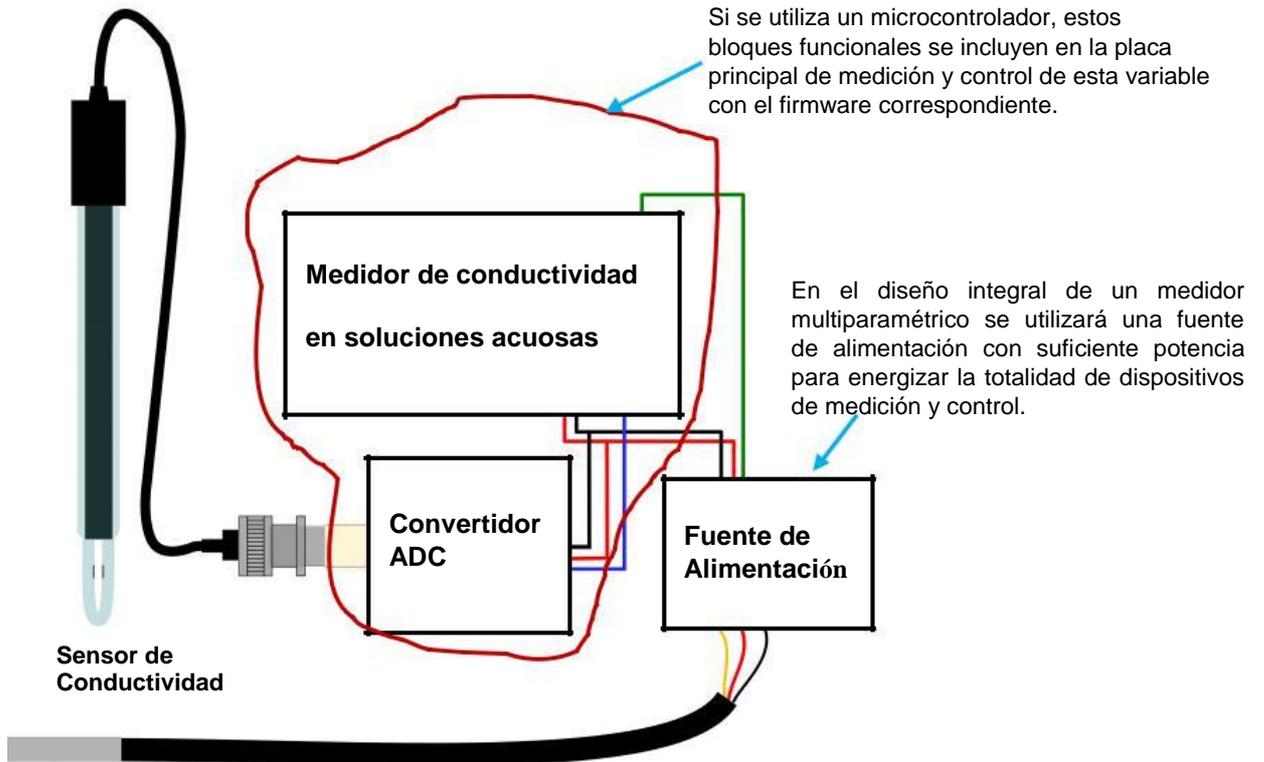
La tabla de valores de conductividad de diferentes tipos de sensores es:

| Modelo     | Concentración de la Solución | Temperatura de la Solución ( °C ) | Valor de Conductividad |
|------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| DJS-0.1    | 0.001 mol/L KCL              | 25                                | $1.468 \times 10^{-4}$ |
|            |                              | 30                                | $1.64 \times 10^{-4}$  |
| 260, DJS-1 | 0.01 mol/L KC                | 25                                | $1.413 \times 10^{-3}$ |
|            |                              | 30                                | $1.522 \times 10^{-3}$ |
| DJS-10     | 0.1 mol/L KCL                | 25                                | $1.28 \times 10^{-2}$  |
|            |                              | 30                                | $1.414 \times 10^{-2}$ |

Las dimensiones del sensor de conductividad<sup>[36]</sup> a utilizar son:



## Diagrama de Conexión del Esquema de Medición



**Figura 8.- Esquema de Conexión del Medidor de Conductividad**

Este diagrama de conexionado está en vinculación con el diseño del medidor electrónico de conductividad, del Punto 3.2.6) anterior, Figura 7). Corresponde a una medición sectorial o de una única variable ambiental como es la conductividad, con sus partes funcionales identificadas por separado.

### 3.3.- Medición de Oxígeno Disuelto

#### 3.3.1.- Principio de medición de Oxígeno Disuelto

Es conocido que la buena calidad del agua es muy importante para la vida de los organismos acuáticos, y el oxígeno disuelto es uno de los parámetros importantes que refleja dicha calidad. Un nivel bajo de oxígeno disuelto en el agua provoca dificultades respiratorias para los organismos acuáticos, lo que puede amenazar la vida de los mismos. Además de la calidad del agua en ríos, lagos, la medición de oxígeno disuelto es de utilidad en la agricultura, el medio ambiente, las ciencias naturales, etc.

El sensor Analog Dissolved Oxygen Sensor SKU:SEN0237<sup>[12]</sup>, es una sonda galvánica, que no necesita tiempo de polarización y está disponible en forma inmediata para medición con solo conectarla al convertidor de señal, se puede integrar con facilidad a otros sensores en diferentes sistemas de medición y control de variables ambientales. La solución de llenado de la sonda y la tapa de membrana son reemplazables, lo que permite bajo costo de mantenimiento.

La solución de relleno es 0.5 mol / L, es una solución de Hidróxido de Sodio, NaOH. También es conocida como soda cáustica y absorbe humedad. Hay que tener cuidado durante su operación por ser corrosiva. Como el sensor de OD consumirá un poco de oxígeno durante la medición, hay que agitar suavemente la solución y dejar que el oxígeno se distribuya uniformemente en el agua.

Una alternativa al sensor SEN0237, es el sensor de Oxígeno disuelto (DO) BT34i CMA<sup>[13]</sup> que mide la concentración de oxígeno disuelto en muestras de agua en el intervalo de 0 a 15 mg /L. Prácticamente para realizar mediciones de oxígeno disuelto ambas sondas tienen similitud en el preparado de la medición.

#### Especificaciones

Una Sonda de oxígeno disuelto como la SEN0237 tiene algunas características a destacar, como las siguientes:

Tipo: Sonda Galvánica

- Rango de detección: 0 - 20 mg / L
- Rango de temperatura: 0 - 40 °C
- Tiempo de respuesta: Hasta 98% de respuesta completa, dentro de los 90 segundos a (25 °C)
- Rango de presión: 0 ~ 50 PSI (libra de fuerza por pulgada cuadrada (lbf/in<sup>2</sup> o lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>)
  - Vida útil del electrodo: 1 año (uso normal)
  
- Periodo de mantenimiento:
  - Período de reemplazo de la tapa de membrana:
    - 1 - 2 meses (en agua fangosa);
    - 4 - 5 meses (en agua limpia)
  - Período de reemplazo de la solución de llenado: una vez al mes.
  - Longitud del cable: 2 metros
  - Conector de sonda: BNC

Una de las características a tener presente en diferentes sensores es el preparado de la sonda y el reemplazo de la solución de llenado como se indica en el punto 3.3.2 siguiente.

### 3.3.2.- Preparado de la prueba

En general para una nueva sonda de oxígeno disuelto, se debe agregar 0.5 mol / L de solución de NaOH en la tapa de la membrana en primer lugar como solución de relleno. Si la sonda se ha utilizado durante un tiempo y el error aumenta mucho, es hora de cambiar la solución de llenado. El siguiente tutorial detalla cómo llenar la sonda con la solución de NaOH.

Como se indica en la Figura 9) siguiente, se desenrosca la tapa de la membrana de la sonda y se llena aproximadamente 2/3 del volumen de la tapa con 0.5 mol / L de solución de Hidróxido de Sodio, NaOH. La sonda debe estar en posición vertical con respecto al plano horizontal. Luego con cuidado, atornillar la tapa a la sonda. Una pequeña parte de la solución se hace desbordar de la tapa para garantizar que la sonda esté completamente llena de solución de NaOH.

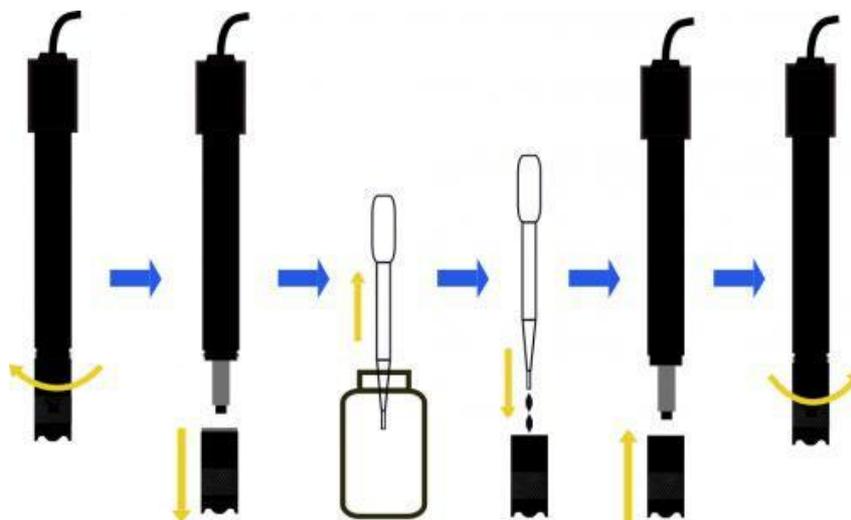
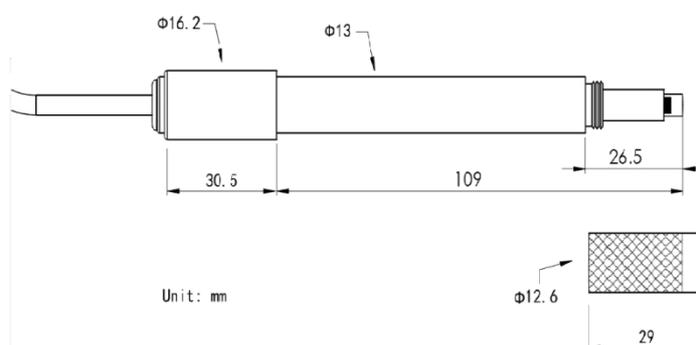


Figura 9.- Preparación de la sonda para medición de oxígeno disuelto

Las dimensiones del sensor de oxígeno disuelto son:



### 3.3.3.- Diagrama de Conexionado del Esquema de Medición

Cuando la sonda, de la Figura 9) anterior, se llena con solución de NaOH, necesita calibración por una vez. Se conecta la sonda al conector BNC de la placa del convertidor de señal utilizando una entrada analógica disponible por la placa de un dispositivo electrónico de medición o a un convertidor ADC del microcontrolador a utilizar.

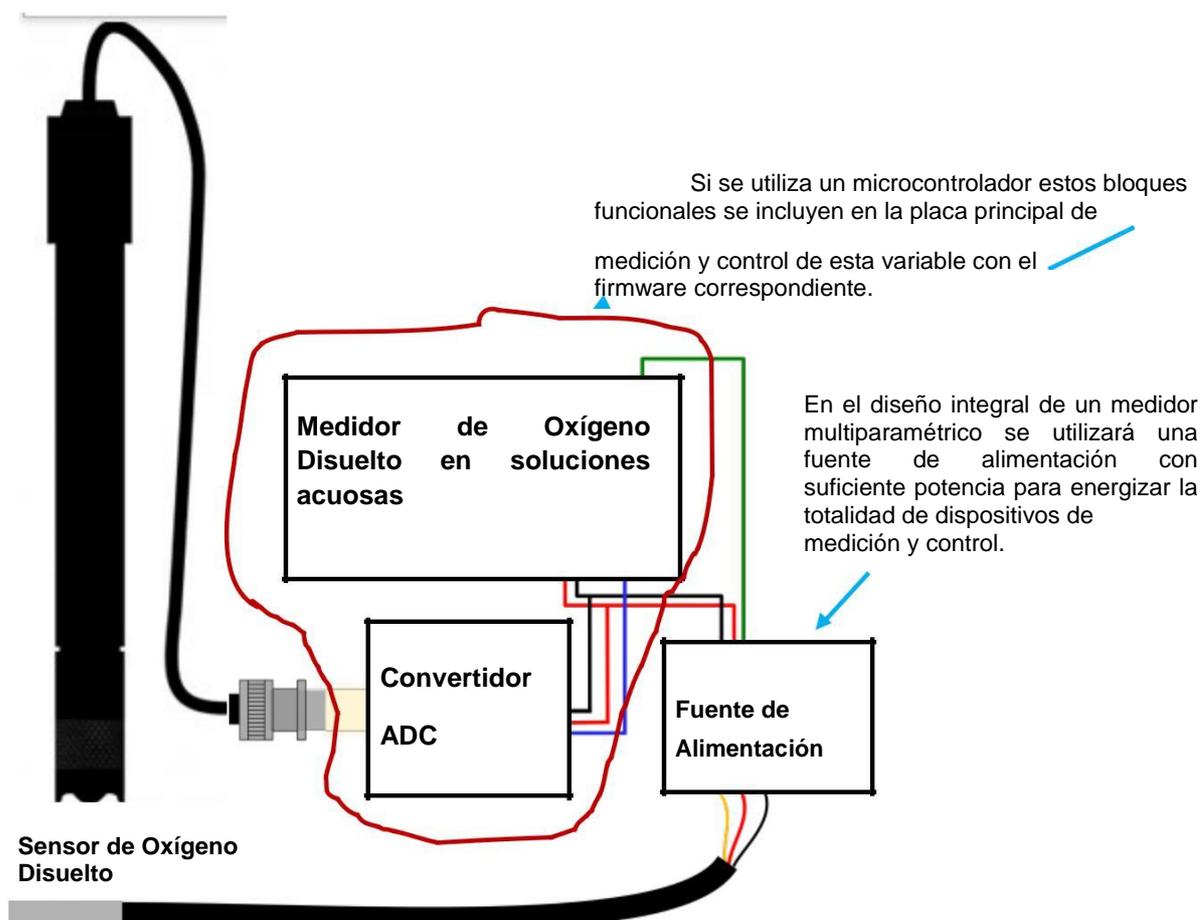
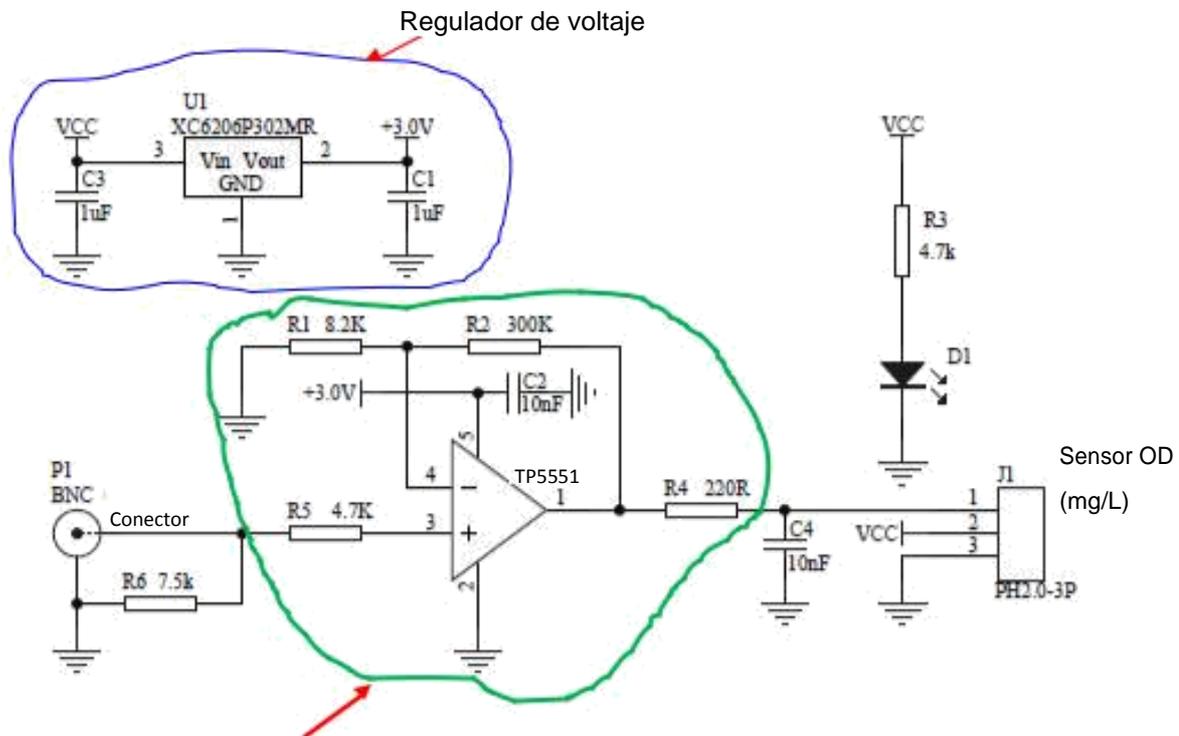


Figura 10.- Esquema de conexionado del Medidor de Oxígeno Disuelto

### 3.3.4.- Diseño de un dispositivo electrónico de medición de Oxígeno Disuelto



Amplificador de elevada ganancia, entrada muy pequeña. Diseñado para tener ultra bajo offset de voltaje y deriva de la temperatura de compensación, Minimizando el consumo de energía.

Figura 11.- Diseño de dispositivo electrónico para medir oxígeno disuelto

### 3.4. - Medición de pH

Una solución acuosa puede contener niveles ácidos, alcalinos o neutros. En química, esto se mide mediante una escala numérica, llamada pH, que representa la potencia del hidrógeno. El pH se define como el logaritmo negativo de la actividad de iones de hidrógeno en una sustancia,  $\text{pH} = -\log(\text{H}^+)$ . Esta escala es logarítmica y va de 1 a 14. El valor de pH de una sustancia está relacionado con las concentraciones de iones de hidrógeno  $[\text{H}^+]$  y con las de los iones de hidroxilos  $[\text{OH}^-]$ . Si hay mayor concentración de iones de hidrógeno que de hidroxilos la sustancia es ácida, tiene iones de hidrógeno libres y su pH es menor que 7. Si los iones se encuentran en equilibrio la sustancia es neutra y el pH es igual a 7. Si hay una mayor concentración de iones de hidroxilos que iones de hidrógeno la sustancia es alcalina, tiene iones de hidroxilos libres y su pH se encuentra entre 7 y 14.

De manera que si la solución a medir es una solución alcalina o ácida no demasiado diluida (por encima de 0.001M) la actividad de los iones de hidrógeno se puede aproximar por la concentración de los mismos y el nivel de pH se puede expresar matemáticamente según la fórmula vista en el párrafo anterior. Si se considera como un ejemplo, que la concentración de iones de hidrógeno es  $1.0 \times 10^{-2}$  moles / litro, entonces  $\text{pH} = -\log(1.0 \times 10^{-2}) // -\log(0,01) = -(-2) = 2 //$  da un valor de 2. Una solución acuosa como el agua destilada tiene un valor de pH de 7, que es un valor neutro.

La escala logarítmica da un grado de acidez de una solución en comparación con otra. Por ejemplo, una solución con un valor de pH de 5 es 10 veces más ácida que una

solución con un valor de pH de 6 y 1000 veces más ácida que una solución con un valor de pH de 8.

Según las tecnologías utilizadas para la medición de pH existen dos grandes grupos: Electroquímicos y ópticos según el ámbito de aplicación. El método convencional en laboratorios y en la industria es a través del electrodo de vidrio. Los electroquímicos utilizan dispositivos que convierten la actividad química del ión de hidrógeno en una señal eléctrica.

### 3.4.1.- Indicadores de pH

Hay diversas maneras de medir el nivel de pH de una solución acuosa. Algunas de ellas son a través de un indicador de papel de tornasol o mediante el uso de una sonda de vidrio, entre otros métodos.

### 3.4.2.- Papel de tornasol

Un indicador de papel de tornasol generalmente está compuesto por tintes extraídos de líquenes que sirven como un indicador de nivel de pH. Una vez en contacto con una solución, el papel tiene una reacción química que produce un cambio en el color que indica el nivel de pH. Esta categoría incluye básicamente dos métodos: uno implica comparar el color estándar correspondiente a un pH conocido con el color de un indicador sumergido en el líquido de prueba utilizando una solución tampón, y el otro método consiste en preparar papel de prueba de pH empapado en el indicador, luego sumergiendo el papel en el líquido de prueba y comparando su color con el color estándar. Aunque los dos métodos mencionados son fáciles de implementar, pueden ser propensos a errores resultantes de la temperatura y sustancias extrañas en la solución de prueba.

### 3.4.3.- Sonda de vidrio de pH

El indicador de pH más utilizado es una sonda de pH. Consiste en un electrodo de medición de vidrio y un electrodo de referencia <sup>[26]</sup>. Una sonda de vidrio típica está formada por una fina membrana de vidrio que encierra una solución de cloruro de hidrógeno (HCl). Dentro del gabinete hay un cable plateado recubierto con AgCl, que actúa como un electrodo de referencia que está en contacto con la solución de HCL.

Los iones de hidrógeno fuera de la membrana de vidrio se difunden a través de la membrana de vidrio y desplazan un número correspondiente de iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ), que normalmente están presentes en la mayoría de los vidrios. Este ion positivo es sutil y se limita principalmente a la superficie del vidrio en cualquier lado de la membrana que tenga la menor concentración. El exceso de carga del  $\text{Na}^+$  genera una diferencia de voltaje en la salida del sensor. La sonda es similar a una batería. Cuando la sonda se coloca en una solución, el electrodo de medición genera un voltaje que depende de la actividad del hidrógeno en la solución, que se compara con el potencial del electrodo de referencia. A medida que la solución se vuelve más ácida (valor de pH más bajo), el potencial del electrodo de vidrio se vuelve más positivo (+ mV) en comparación con el electrodo de referencia, y cuando la solución se vuelve más alcalina (valor de pH más alto), el potencial del electrodo de vidrio se convierte en más negativo (-mV) en comparación con el electrodo de referencia. La diferencia entre estos dos electrodos es el potencial medido. Una sonda de pH típica produce idealmente 59,154 mV / pH unidades a 25°C.

### 3.4.4.- Acondicionamiento de señal analógica del sensor

Para obtener un acondicionamiento adecuado de la señal analógica de la sonda de pH es necesario analizar el diagrama eléctrico equivalente de la misma.

Como se describió en el punto anterior, la sonda de pH está hecha de vidrio que crea una resistencia extremadamente alta que puede variar desde 1 MΩ hasta 1 GΩ y actúa como resistencia en serie con la fuente de voltaje de pH como se muestra en la figura siguiente.

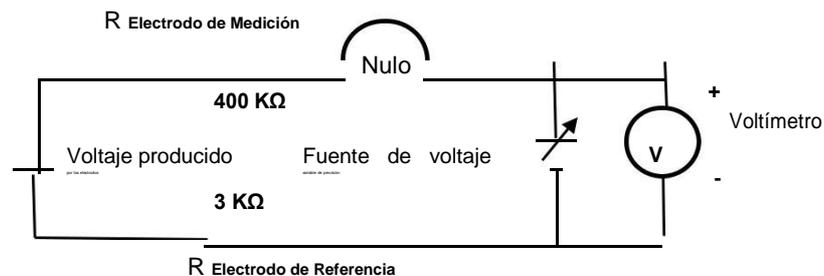


Figura 12.- Configuración equivalente del circuito eléctrico de la sonda de pH.

En la Figura 12), se muestra un circuito equivalente a cómo trabaja una sonda de pH básicamente, uno de sus electrodos es la referencia y el otro se inserta en la solución a la cual se le quiere medir el pH. Ese segundo electrodo cuenta con una membrana, que para el caso del pH, es sensible al ión hidrógeno. Una corriente de circuito muy pequeña que viaja a través de las altas resistencias de cada componente en el circuito, especialmente la membrana de vidrio del electrodo de medición, producirá caídas de voltaje importantes a través de esas resistencias, reduciendo seriamente el voltaje observado por el medidor. Lo que hace más compleja la medición es, el hecho de que el voltaje generado por el electrodo de medición es muy pequeño, en el rango de mV (idealmente 59,16 mV por unidad de pH a temperatura ambiente). En consecuencia el medidor a utilizar para la medición de pH debe ser muy sensible y tener una resistencia de entrada extremadamente alta.

Como cualquier celda electroquímica, entre los electrodos se genera una diferencia de potencial E, según la ecuación de Nernst, (6), es lo que efectivamente se mide y que está relacionada directamente con la medida de pH de la solución:

$$E = a - \frac{2.303 \times R (T+273.1)}{n \times F} \times (\text{pH} - \text{pH}_{\text{ref}}) \quad (6)$$

$E$  = voltaje del electrodo de hidrógeno con actividad desconocida  
 $a$  =  $\pm 30$  mV, tolerancia del punto cero  
 $T$  = temperatura ambiente en 25 °C  
 $n$  = 1 a 25 °C, valencia (número de cargas en el ion)  
 $F$  = 96485 coulombs / mol, constante de Faraday  
 $R$  = 8.314 voltios-coulombs / °K mol, el número de Avogadro  
 $pH$  = concentración de iones de hidrógeno de una solución desconocida  
 $pH_{ref} = 7$ , concentración de ion de hidrógeno de referencia

Un **mol** es la cantidad de sustancia que contiene tantas partículas (átomos moléculas, iones, etc.) como existen en 12 g del isótopo de carbono 12. Un **mol** de cualquier compuesto contiene siempre una cantidad de moléculas igual al número de Avogadro ( $6,02 \cdot 10^{23}$ ) y se utiliza mucho para efectuar los cálculos químicos.

La ecuación (6) muestra que el voltaje generado ( $E$ ), depende de la acidez o alcalinidad de la solución y varía con la actividad del ion hidrógeno de una manera conocida. El cambio en la temperatura de la solución cambia la actividad de sus iones de hidrógeno. Cuando la solución se calienta, los iones de hidrógeno se mueven más rápido, lo que resulta en un aumento de la diferencia de potencial entre los dos electrodos. Además, cuando la solución se enfría, la actividad del hidrógeno disminuye, lo que provoca una disminución de la diferencia de potencial. Los electrodos están diseñados idealmente para producir un potencial de cero voltios cuando se colocan en una solución tampón con un valor de pH de 7.

Una sonda de pH típica tiene una especificación como se muestra en la siguiente tabla:

| Rango de Medición        | pH 0 a pH14                              |
|--------------------------|--|
| pH a 0 V                 | pH 7.00 $\pm$ 0.25                       |
| Exactitud                | pH 0.05 en el rango de 20 °C a 25 °C     |
| Resolución               | pH 0.0 equivalente a 10.1 mV             |
| Temperatura de Operación | máximo 80°C                              |
| Tiempo de reacción       | $\leq$ 1 seg para el 95% del valor final |

**Tabla 1. Especificación típica de una sonda de vidrio de pH**

Una sonda de pH juega un papel importante, ya que la confiabilidad de los datos dependerá de la precisión del sensor y su estabilidad. Dos factores clave que se consideran al elegir una sonda de pH son, **su tiempo de estabilidad después de un cambio de temperatura y su tiempo de estabilidad después de un cambio en el valor de pH de la solución tampón.**

La Tabla 2 muestra diferentes valores de pH para indicar el rango de medición de pH de 1 a 14.

**CALCULO DE pH ( pH=-log(H+))**

| Base 10 | H <sup>+</sup><br>(mol/L) | 10 <sup>H</sup><br>Cálculo Pot | log(H+) | pH=-log(H+) |
|---------|---------------------------|--------------------------------|---------|-------------|
| 10      | -2,00                     | 0,01                           | -2      | 2           |
| 10      | -1,00                     | 0,1                            | -1      | <b>1</b>    |
| 10      | 2,00                      | 100                            | 2       | -2          |
| 10      | 1,00                      | 10                             | 1       | -1          |
| 10      | -3,00                     | 0,001                          | -3      | 3           |
| 10      | -4,00                     | 0,0001                         | -4      | 4           |
| 10      | -5,00                     | 0,00001                        | -5      | 5           |
| 10      | -6,00                     | 0,000001                       | -6      | 6           |
| 10      | -7,00                     | 0,0000001                      | -7      | <b>7</b>    |
| 10      | -8,00                     | 0,00000001                     | -8      | 8           |
| 10      | -9,00                     | 0,000000001                    | -9      | 9           |
| 10      | -10,00                    | 1E-10                          | -10     | 10          |
| 10      | -11,00                    | 1E-11                          | -11     | 11          |
| 10      | -12,00                    | 1E-12                          | -12     | 12          |
| 10      | -13,00                    | 1E-13                          | -13     | 13          |
| 10      | -14,00                    | 1E-14                          | -14     | <b>14</b>   |

**Tabla 2. Cálculos de pH**

### 3.5.- Conversión Analógico/Digital (ADC)

Para este tipo de aplicación, dado el tiempo de respuesta del sensor, la frecuencia de muestreo para la recolección de datos ahora será un tema a considerar. Con una resolución de sensor dada de 0,001 Vrms y un rango de voltaje de escala total de ADC de 1 V, no se requerirá un ADC de alta resolución para lograr una resolución efectiva de 9,96 bits. La resolución libre de ruido se define en unidades de bits con la ecuación: Resolución libre de ruido = log<sub>2</sub> [rango de voltaje de entrada de escala completa / ruido de salida de voltaje pico a pico de sensor]. La tasa de muestreo del ADC puede ser un factor importante para la aplicación de baja potencia, ya que la tasa de muestreo del ADC está directamente relacionada con su consumo de energía. Por lo tanto, dado el tiempo de respuesta del sensor, la tasa de muestreo típica de ADC se puede establecer en su rendimiento más bajo. Se puede usar un microcontrolador con un ADC integrado para reducir el conteo de componentes.

### 3.6.- Transceptor

La transmisión de datos de pH y temperatura, y demás información generada durante el procesamiento de medición, requiere un transceptor, con las funciones de control y comunicación a cargo de un microcontrolador. La elección tanto del transceptor como del microcontrolador implica algunas consideraciones importantes.

Para la elección de un transceptor debe tenerse en cuenta:

- Frecuencia de operación
- Rango de distancia máxima
- Tasa de datos
- Licencias

### **3.6.1- Frecuencia de operación**

Al diseñar la transmisión de RF, la frecuencia de operación (OF) debe determinar si una frecuencia sub GHz o de 2,4 GHz cumplirá los requisitos de la aplicación. En una aplicación que requiere una alta velocidad de datos y utiliza un ancho de banda amplio como Bluetooth, la frecuencia de 2.4 GHz es la mejor opción para usar. Pero cuando la aplicación es industrial, se utilizará un sub-GHz debido a los protocolos disponibles que proporcionan fácilmente la capa de enlace de la red. Las frecuencias de trabajo en el rango de sub-GHz que los sistemas propietarios utilizan principalmente son 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz. **A esto se pueden agregar comunicación por WiFi y por IoT.**

### **3.6.2.- Rango de Distancia Máxima**

Las frecuencias por debajo a GHz ofrecen una capacidad de largo alcance que puede disponer de potencia elevada y alcanzar más de 25 km. Estas frecuencias, cuando se usan en topología simple de punto a punto o estrella, pueden pasar efectivamente a través de paredes y otras barreras.

### **3.6.3.- Velocidad de datos**

La velocidad de datos (bits/seg) también debe determinarse, ya que afecta la capacidad de la distancia de transmisión y el consumo de energía del transceptor. Una velocidad de datos más alta consume menos energía y se puede usar en una distancia corta, mientras que una velocidad de datos más baja consume más energía y se puede usar en la transmisión a larga distancia. Aumentar la velocidad de datos es un buen método para mejorar el consumo de energía, ya que solo extrae ráfagas de corriente de la batería en cortos períodos de tiempo, pero esto también reduce la distancia de cobertura de radio. Utiliza una energía pulsante para enviar información.

### **3.6.4.- Consumo de Energía del Transceptor**

El consumo de energía del transceptor es importante para las aplicaciones alimentadas por batería. Este también es un factor en muchas aplicaciones inalámbricas porque condiciona la velocidad de datos y el rango de distancia. El transceptor tiene dos opciones de amplificador de potencia (AP) para permitir una mayor flexibilidad de uso. El AP de un solo extremo puede generar hasta 13 dBm de potencia de RF y el AP diferencial puede generar hasta 10 dBm. A modo de ilustración, la Tabla 3 muestra un resumen de algunas de las potencias de salida de AP frente al consumo de corriente IDD del transceptor. Para completar, también se muestra el consumo de corriente en el modo recepción.

| Estado del transceptor<br>(868 MHz / 915 MHz) | Potencia de salida<br>(dBm) | Consumo de Corriente<br>(mA) |
|---|-----------------------------|------------------------------|
| Modo Tx                                       | -10                         | 10.3                         |
|   | 0                           | 13.3                         |
|   | +10                         | 24.1                         |
|   | +13                         | 32.1                         |
| Modo Diferencial Tx                           | -10                         | 9.3                          |
|   | 0                           | 12                           |
|   | +10                         | 28                           |
| Modo Rx                                       | -----                       | 12.8                         |

**Tabla 3. Consumo de potencia de salida de AP vs. Transceptor IDD  
Resumen de consumo**

Esta Tabla tiene que acompañarse de los consumos de los diferentes dispositivos electrónicos y sonda de medición para determinar el consumo de energía total del medidor de pH resultante, y en el caso de utilizar baterías como fuente de alimentación para determinar su vida útil.

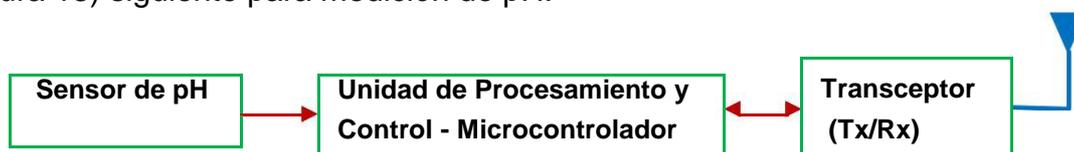
### 3.6.5.- Licencias

Las frecuencias por debajo de 1 Ghz, Sub-GHz, incluyen licencias libres en las bandas de 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz. Se utiliza ampliamente en aplicaciones industriales y de servicios, y en general en una amplia variedad de aplicaciones inalámbricas. Se cumple con la normativa europea ETSI EN300-220 y la normativa de USA, FCC Parte 15.

### 3.7- Procesador (Microcontrolador-Microprocesador)

Como se muestra en las Figuras 1), 2) y 3), el corazón de los sistemas de medición es una unidad de procesamiento, sea un microprocesador o microcontrolador que procesa datos e información, controla y supervisa el funcionamiento de los dispositivos electrónicos, realiza la comunicación bidireccional y efectúa la visualización, mediante la ejecución de firmware específicamente elaborado.

Un esquema simplificado de medición de pH en soluciones acuosas se presenta en la Figura 13) siguiente para medición de pH.



**Figura 13. Diagrama en bloques general de adquisición, procesamiento y transmisión de datos de medición de pH.**

La elección de un microcontrolador implica algunas consideraciones que deben tenerse en cuenta:

- **Periféricos:** Un microcontrolador debe estar integrado con periféricos como un bus SPI. El transceptor y la placa de diseño de referencia de pH deben estar conectados a través de SPI y por lo tanto se requieren básicamente dos periféricos SPI.
- **Memoria:** Con una cantidad adecuada decente de memoria, un microcontrolador es donde se lleva a cabo el procesamiento del protocolo y la interfaz del sensor. Memorias Flash y RAM son dos componentes muy críticos de los microcontroladores. Para asegurarse de que el sistema no se quede sin espacio, se deben utilizar como mínimo 128 kB. Los algoritmos de aplicación y software se ejecutarán sin problemas, lo que dará lugar a posibles actualizaciones e inclusión de funciones adicionales.
- **Potencia de procesamiento:** El microcontrolador debe ser lo suficientemente rápido para manejar cálculos y procesos complejos. El sistema de medición final integrado con medición de otras variables en soluciones acuosas como se indica en la Figura 1) anterior, utiliza un microcontrolador de 32 bits multinúcleo, con suficiente capacidad para aplicaciones adicionales y exigencias de algoritmos.
- **Consumo de energía:** El consumo de energía del microcontrolador debe ser muy bajo, al igual que el resto de los elementos utilizados en el medidor de pH o en Sistema de Medición Multivariables en un ámbito como soluciones acuosas. La energía es fundamental en todos los casos sean por diseño de una fuente de alimentación como por el uso de baterías. Las aplicaciones que funcionan con una batería deben funcionar durante un tiempo prolongado.

### 3.8.- Soluciones de diseño de hardware

A continuación se presentan una serie de consideraciones de diseño a tener presentes sean que se utilice un microcontrolador de 32 bits, un chip programable como el PSoC5 o PSoC6 o dispositivos electrónicos específicamente diseñados con componentes electrónicos individualmente seleccionados.

#### 3.8.1.- Amplificador de Entrada

**Para la medición de pH, así como para las demás mediciones de variables en soluciones acuosas como se presenta en las Figura 1) y 3) anteriores**, se necesita un amplificador de entrada con alta impedancia de entrada y una corriente de polarización de entrada muy baja para aislar el circuito de esta resistencia. Un amplificador operacional de bajo ruido CMOS como el AD8603 se puede usar como un amplificador de búfer para esta aplicación. La baja corriente de entrada del AD8603 minimiza el error de voltaje producido por la corriente de polarización que fluye a través de la resistencia del electrodo.

Para una corriente de polarización de entrada típica de 200 pA, el error de compensación es de 0.2 mV (0.0037 pH) para una sonda de pH que tiene una resistencia en serie de 1 GΩ a 25 °C. Incluso con la corriente de polarización de entrada máxima de 1 pA, el error es solo 1 mV. Aunque no es necesario, se pueden usar protecciones, blindajes, separaciones de alta resistencia de aislamiento y otros métodos para minimizar las fugas en la entrada de alta impedancia del amplificador operacional elegido.

Las principales características de este amplificador operacional tomado como referencia son:

Voltaje de offset bajo: 50  $\mu$ V máximo  
Baja corriente de entrada: 1 pA máximo  
Operación de Voltaje: 1.8 V a 5 V  
Bajo nivel de ruido: 22 nV /  $\sqrt{\text{Hz}}$   
Micropotencia: 50  $\mu$ A máximo.  
Baja distorsión  
Sin inversión de fase  
Unidad de ganancia estable

Se pueden realizar aplicaciones con: fuente de alimentación de energía con pilas o baterías; filtros multipolos, sensores y amplificadores de entrada o salida ASIC de baja potencia

### **3.8.2.- Conversor Analógico a Digital (ADC)**

Un convertidor ADC de baja potencia es aconsejable para esta aplicación. Como referencia y luego se puede cambiar por otro ADC, se utiliza un AD7792<sup>[22]</sup>, de 16 bits para aplicaciones de medición de precisión. Tiene una entrada de 3 canales que tiene poco ruido: solo 40 nV rms de ruido cuando la velocidad de actualización es de 4.17 Hz. Funciona con una fuente de alimentación de 2,7 V a 5,25 V, y tiene un consumo de corriente típico de 400  $\mu$ A. Las características adicionales incluyen una referencia de intervalo de banda interna con una deriva de 4 ppm / °C (típica), un consumo máximo de corriente de apagado de 1  $\mu$ A y un oscilador de reloj interno para reducir el recuento de componentes y el espacio de PCB.

### **3.8.3.- Elección del Microcontrolador y Transceptor de RF**

En base a los requisitos anteriores, se puede utilizar un Microcontrolador de precisión de 32 bits ARM Cortex-M3 con Transceptor RF incorporado como el ADuCRF101 de Analog Devices. El ADuCRF101 es una solución de adquisición de datos totalmente integrada diseñada para aplicaciones inalámbricas de baja potencia. El transceptor del ADuCRF101 funciona a 431 MHz a 464 MHz y 862 MHz a 928 MHz. Este microcontrolador está integrado con periféricos de comunicación como los dos buses SPI requeridos. Tiene una memoria Flash / EE de 128 KB y 16 kB de SRAM. Las características de este microcontrolador minimizan el número de componentes y el tamaño de la placa de la aplicación resultante.

Se pueden utilizar otros elementos como el chip programable PSoC 5, de CYPRESS que contiene un microcontrolador de 32 bits, multinúcleo, con numerosos componentes analógicos y digitales integrados en un solo chip. Aunque no tiene elementos para la comunicación exterior, se puede programar para interactuar con transceptores externos a elección.

El PSoC6, es un chip programable que también se puede utilizar con la ventaja de disponer de diversos elementos de comunicación a simple elección incluida la posibilidad de comunicación por IoT, en consecuencia la comunicación está soportada en hardware interno. Este chip programable tiene 1 MB de aplicación con una EEPROM de 32 KB y 32 KB Flash.



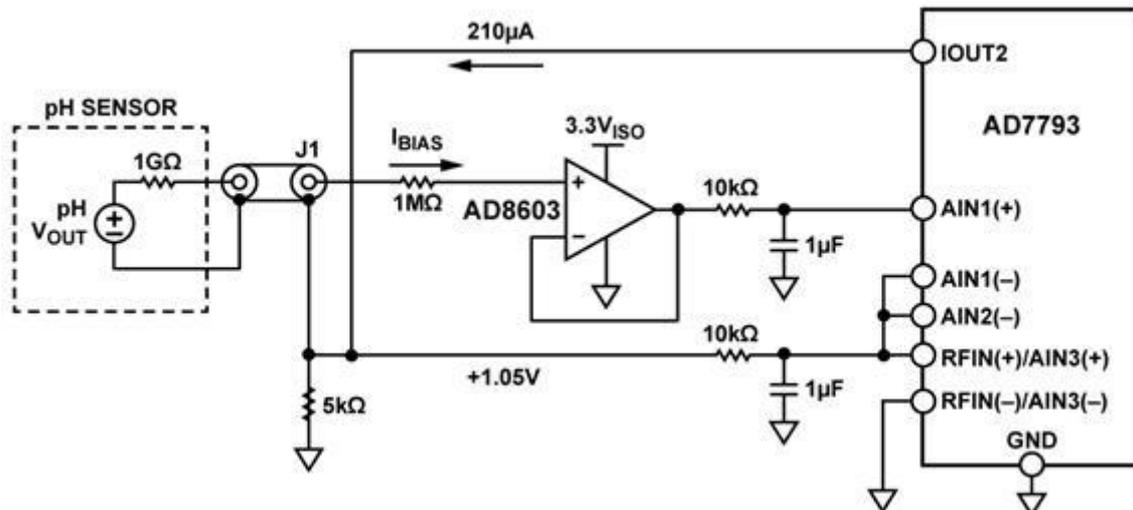


Figura 15.- Medidor de pH, con Sensor de pH e interfaz de búfer con ADC (Esquema simplificado: todas las conexiones, RTD y desacoplamiento no se muestran)

La corriente de polarización del amplificador de búfer que fluye a través de esta serie de resistencia introduce un error de compensación en el sistema. Para aislar el circuito de esta alta resistencia de fuente, se necesita un amplificador de búfer con alta impedancia de entrada y una corriente de polarización de entrada muy baja para esta aplicación. El AD8603 se usa como un amplificador de búfer para esta aplicación, como se muestra en la Figura 16. La baja corriente de entrada del AD8603 minimiza el error de voltaje producido por la corriente de polarización que fluye a través de la resistencia del electrodo. Para una corriente de polarización de entrada típica de 200 pA, el error de compensación es de 0.2 mV (0.0037 pH) para una sonda de pH que tiene una resistencia serie de 1 GΩ a 25°C. Incluso con la corriente de polarización de entrada máxima de 1 pA, el error es de solo 1 mV.

La frecuencia de corte del filtro de ruido de paso bajo de 10 kΩ / 1 μF para la salida del amplificador de búfer viene dada por  $f = 1 / 2\pi RC$ , o 16 Hz.

Se deben usar dispositivos de protección y elevada resistencia de aislamiento para minimizar las fugas en la entrada de alta impedancia del AD8603.

Para la **configuración del Canal 1 del ADC, sensor de pH**, se debe tener presente que como básicamente el medidor de pH debe medir el pequeño voltaje generado por el electrodo de pH. La Tabla 1) anterior muestra las especificaciones de una sonda de pH típica. Según la ecuación de Nernst, la tensión de rango completo de la sonda puede variar desde ± 414 mV (± 59.14 mV / pH) a 25 ° C hasta ± 490 mV (± 70 mV / pH) a 80 °C.

Al leer el voltaje de salida de la sonda de pH, el ADC usa la referencia externa de 1.05 V y está configurado con una ganancia de 1. El rango de entrada de escala completa es  $\pm V_{REF} / G = \pm 1.05 V$ , y la señal máxima de la sonda de pH es de ± 490 mV a 80 ° C. Debido a que la salida del sensor es bipolar, y el AD7793 opera desde una sola fuente de alimentación, la señal generada por la sonda de pH debe polarizarse por encima de la tierra para que esté dentro del rango aceptable de modo común del ADC. Esta tensión de polarización se genera inyectando la corriente IOOUT2 de 210 μA en la resistencia de 5 kΩ, 0.1% como se muestra en la Figura 16. Esto genera la tensión de polarización de modo común de 1.05 V que también sirve como tensión de referencia de ADC.

Para la **configuración del Canal 2 del ADC, sensor de temperatura mediante RTD**, se debe considerar que el segundo canal del ADC controla el voltaje generado a través de un RTD controlado por los pines de salida de corriente IOU2 del AD7793. La corriente de excitación de 210  $\mu$ A controla la combinación en serie del RTD y la resistencia de precisión (5 k $\Omega$ , 0.1%). Ver Figuras 14) y 15) anteriores.

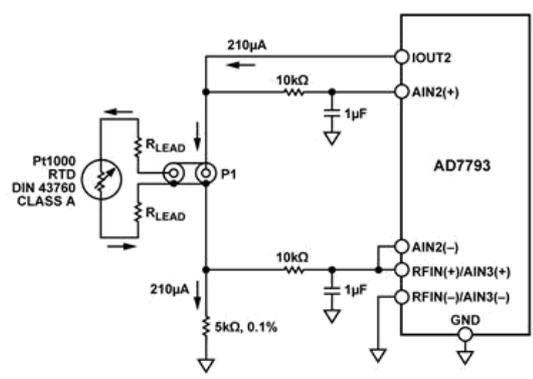
El coeficiente de temperatura para platino puro es 0.003926  $\Omega / \Omega / ^\circ C$ . El coeficiente normal para RTD industriales es de 0,00385  $\Omega / \Omega / ^\circ C$  según la norma DIN Std. 43760-1980 y IEC 751-1983. La precisión de un RTD se suele establecer a 0  $^\circ C$ . La norma DIN 43760 reconoce dos clases como se muestra en la Tabla 2, y ASTM E – 1137 reconoce dos grados.

La resistencia del RTD varía de 0 $^\circ C$  (1000 $\Omega$ ) a 100  $^\circ C$  (1385 $\Omega$ ), produciendo un rango de señal de voltaje de 210 mV a 290 mV con una corriente de excitación de 210  $\mu$ A.

La resistencia de precisión de 5 k $\Omega$  genera los 1.05 V utilizados como referencia externa. Con una ganancia de uno, el rango de entrada analógica es de  $\pm 1.05 V$  ( $\pm V_{REF} / G$ ). Esta arquitectura da una configuración ratiométrica. Los cambios en el valor de la corriente de excitación no afectan la precisión del sistema.

Si bien los RTD de 100  $\Omega$  son populares, se pueden especificar otras resistencias (200  $\Omega$ , 500  $\Omega$ , 1000  $\Omega$ , etc.) y materiales (níquel, cobre, níquel y hierro). Esta aplicación utiliza un RTD de clase A DIN 43760 de 1 k $\Omega$  para la compensación de temperatura del sensor de pH. Un RTD de 1000 $\Omega$  es menos sensible a los errores de resistencia del cableado que un RTD de 100 $\Omega$ .

Se realiza una conexión de 2 cables como se muestra en la Figura 16) siguiente. Se aplica una corriente constante a través de los cables del RTD, y se mide la tensión a través del propio RTD. El dispositivo de medición es el AD7793 que exhibe alta impedancia de entrada y baja corriente de polarización de entrada. Las fuentes de errores en este esquema son la resistencia del cable, la estabilidad de la fuente de corriente constante producida por AD7793 y la impedancia de entrada y / o la corriente de polarización en el amplificador de entrada y la deriva asociada.



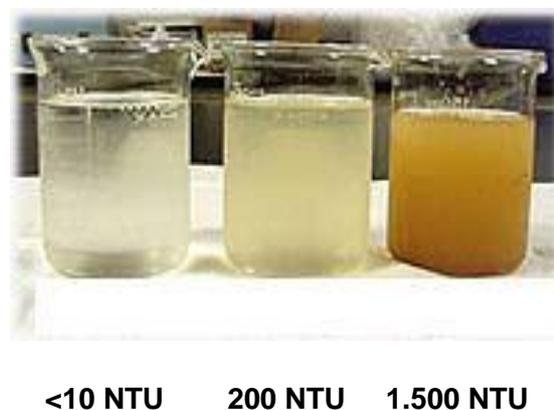
**Figura 16.- Conexiones de RTD de 2 cables (Esquema simplificado: no se muestran La totalidad de las conexiones y desacoplamiento)**

Como conclusión final en la medición de pH se pone de manifiesto que los diseños de dispositivos electrónicos presentados dan una buena solución al problema de medir pH, pero el AD7793 y el ADUM5401 pueden ser reemplazados por Chips programables del tipo PSoC5 o por el PSoC6, con indudables mejoras en la capacidad de procesamiento almacenamiento de datos e información así como en la comunicación bidireccional desde y hacia otros dispositivos que puedan conectarse en red sea mediante transceptores de RF y/o por IoT.

### 3.10- Medición de Turbidez

#### 3.10.1. Medición de Turbidez

La turbidez es uno de los parámetros importantes para determinar la calidad del agua, especialmente en el suministro y tratamiento de agua potable. Se la puede considerar como una medida de la nubosidad o transparencia del agua. Cuanto mayor es la turbidez, más difícil es ver a través del agua. Las mediciones de turbidez se informan en Unidades de Turbidez Nefelométricas (NTU) <sup>[27]</sup> y a simple vista se pueden observar niveles de turbidez a partir de aproximadamente 5 NTU y mayores. Los lagos que se consideran relativamente claros pueden tener una turbidez de hasta 25 NTU. Si el agua parece turbia, su turbidez podría alcanzar al menos 100 NTU. A 2.000 NTU, el agua es completamente opaca. Para ilustrar gráficamente lo que es la turbidez, se presenta la Figura 17) siguiente, con diferentes muestras de turbidez del agua de <10 NTU, 200 NTU y 1.500 NTU <sup>[30]</sup>.



**Figura 17.- Muestras de Turbidez en Agua**

La turbidez se compone de una serie de sustancias: lodo o barro, limo, arena, pequeños pedazos de plantas muertas, bacterias, organismos acuáticos, algas y precipitados químicos contribuyen a la turbidez. La erosión, la descarga de desechos y el escurrimiento urbano pueden agregar sólidos en suspensión a una masa de agua. El escurrimiento agrícola, además de aumentar directamente los sólidos en suspensión, también puede contribuir al crecimiento de las algas. Después de una tormenta o inundación, la turbidez en el agua superficial generalmente aumenta rápidamente debido al aumento en la corriente del agua. El material suspendido en agua turbia puede contener una gran cantidad de patógenos. El agua de enfriamiento industrial, por ejemplo, puede tolerar niveles relativamente altos de sólidos suspendidos sin problemas significativos. Sin embargo, en las calderas modernas de alta presión, el agua debe estar virtualmente libre de impurezas.

La turbidez es un indicador clave utilizado para evaluar la calidad del agua para el consumo humano y en diversas actividades donde se requiera determinada pureza. Según la Organización Mundial para la Salud (OMS), la turbidez del agua para consumo humano no debe ser más, en ningún caso, de 5 NTU, y estará idealmente por debajo de 1 NTU

Por otra parte, como se observa en la Figura 17) anterior, los sólidos suspendidos obstruyen la transmisión de luz a través de una muestra de agua y hace que la turbidez también pueda considerarse como una “expresión de la propiedad óptica que causa que la luz se disperse y absorba en lugar de transmitirse en línea recta a través de la “muestra”. De manera que, la turbidez no es una medida directa de las partículas suspendidas en el agua, sino una medida del efecto de dispersión que dichas partículas tienen sobre la luz.

### **3.10.2.- Teoría de la dispersión de la luz en medición de turbidez**

Como se mencionó, la propiedad óptica expresada como turbidez es la interacción entre la luz y las partículas suspendidas en el agua. Un haz de luz dirigido permanece relativamente intacto cuando se transmite a través de absolutamente agua pura, pero incluso las moléculas en un fluido puro dispersarán la luz hasta cierto punto.

Por lo tanto, ninguna solución tendrá una turbidez cero. En muestras que contienen sólidos suspendidos, la manera en que la muestra interfiere con la transmisión de la luz está relacionada con el tamaño, la forma y la composición de las partículas en la solución y la longitud de onda (color) de la luz incidente.

El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua. La turbidez causa una disminución en la transparencia del agua. La dirección de la trayectoria de la luz transmitida sufrirá cambios cuando la luz toque las partículas en la columna de agua. Si el nivel de turbidez es bajo, se dispersará menos luz de su dirección original. La luz dispersada por partículas como barro, arcilla, algas, materia orgánica y microorganismos puede permitir la detección de estas partículas en el agua. Un turbidímetro, a veces llamado medidor de turbidez es el nombre común para un instrumento que mide la turbidez.

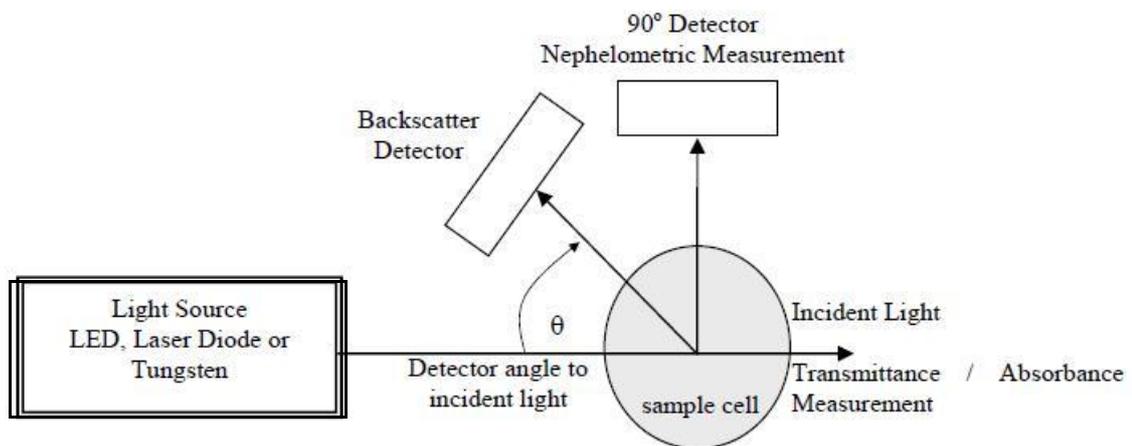
La medición de turbidez de bajo nivel requiere una medición precisa de la luz dispersada en el agua. Con el avance en el desarrollo de sensores fotoeléctricos, se pueden detectar cambios muy pequeños (atenuación) de la intensidad de la luz. Sin embargo, los diseños aún carecen de la capacidad para medir niveles de turbidez altos o muy bajos. Para muestras con turbidez baja, las intensidades de dispersión serán muy pequeñas y difíciles de detectar, ya que la señal podría perderse en el ruido de la

electrónica, mientras que para turbidez más alta, la existencia de dispersión múltiple interferirá con la dispersión directa. Existe un método para mejorar la relación señal / ruido. Esta técnica mide la luz dispersada en un ángulo a la luz incidente. El ángulo de detección de 90° se considera el ángulo más sensible para medir la luz dispersada.

En general, hay dos tipos principales de turbidímetros. Se pueden categorizar como:

- Absorciómetros: miden la absorción (o atenuación) de la intensidad de la luz que pasa a través de la muestra.
- Nefelómetros: miden la porción de luz dispersada en un ángulo de 90° desde el haz incidente.

Además de estas técnicas de medición, la retrodispersión se refiere a la medición de la luz dispersada en un ángulo entre 90 ° y 180 °. La Figura 18 siguiente, muestra varias configuraciones para medir la turbidez a través de un sistema óptico.



**Figura 18.- Técnicas de medición de la turbidez**

### **3.10.3.- Fuente de luz**

Se mide la luz dispersada en un ángulo  $\theta$  con el haz de luz incidente y luego se relaciona esta luz dispersada en un ángulo, con la turbidez real de la muestra. Un ángulo de detección de  $90^\circ$  se considera muy sensible a la dispersión de partículas. Mediciones en ángulos diferentes a  $90^\circ$  se pueden realizar colocando los sensores correspondientes

Las fuentes de luz, de banda estrecha o monocromática se pueden usar para aplicaciones nefelométricas cuando hay tipos específicos de partículas presentes en la muestra o cuando se necesita una fuente de luz bien caracterizada. Un ejemplo de dicha fuente de luz es el diodo emisor de luz (LED), que emiten luz en una banda estrecha en comparación con una fuente incandescente (Figura 18). Debido a que son más eficientes que las lámparas incandescentes para producir luz visible, sus requisitos de potencia para una intensidad dada son mucho más bajas. Otras fuentes de luz utilizadas en instrumentación nefelométrica incluyen láseres, lámparas de mercurio (lámparas de descarga) y varias combinaciones de lámpara / filtro.

### **3.10.4.- Detectores**

Cuando la señal de luz incidente interactúa con la muestra, el instrumento debe detectar su respuesta. Los detectores difieren en su respuesta a una distribución de longitud de onda particular. Los fotomultiplicadores utilizados en la instrumentación nefelométrica tienen una sensibilidad espectral máxima en el extremo casi ultravioleta y azul del espectro visible. Para mantener una buena estabilidad, requieren una fuente de alimentación de alto voltaje bien regulada. Un fotodiodo de vacío generalmente muestra una respuesta espectral similar a la de un fotomultiplicador y es algo más estable que el fotomultiplicador.

Los fotodiodos de silicio generalmente tienen una sensibilidad espectral máxima en la región roja visible o en el infrarrojo cercano.

### **3.10.5.- Geometría óptica**

El tercer componente crítico que afecta la respuesta característica de un nefelómetro es la geometría óptica, que incorpora parámetros de diseño del instrumento como el ángulo de detección de luz dispersada. Como se explica en la sección sobre la teoría de la dispersión, las diferencias en la composición de las partículas de la muestra, causa diferentes intensidades de dispersión angular. Casi todos los nefelómetros utilizados en el análisis de agua y aguas residuales utilizan un ángulo de detección de  $90^\circ$ . Además de ser menos sensible a las variaciones en el tamaño de las partículas, un ángulo de detección de  $90^\circ$  ofrece un sistema óptico simple con una luz dispersa muy baja.

La longitud de la trayectoria recorrida por la luz dispersa es un parámetro de diseño que afecta tanto a la sensibilidad como a la linealidad del instrumento. La sensibilidad aumenta a medida que aumenta la longitud de la trayectoria, pero la linealidad se sacrifica a altas concentraciones de partículas debido a la dispersión múltiple y la absorbancia. A la inversa, si la longitud de la trayectoria disminuye, el rango de linealidad aumenta pero la sensibilidad se pierde en bajas concentraciones (esta compensación puede eliminarse con una longitud de trayectoria ajustable). El uso de una ruta corta también puede aumentar el impacto de la luz parásita, una longitud de recorrido menor a 10 cm en total, es una referencia para el diseño de medidor de turbidez.

### 3.10.6.- Diseño de un medidor de turbidez

A continuación se presenta un sistema de **medición de turbidez del agua de bajo a alto nivel** como se indica en la Figura 19 siguiente.

El circuito propuesto y que se muestra en dicha figura, utiliza un extremo frontal fotométrico y una red de emisores infrarrojos (IR) de 860 nm y fotodiodos de PIN de silicio para lograr un sistema de medición de turbidez del agua. La turbidez no es una medida directa de las partículas suspendidas en el agua, sino una medida del efecto de dispersión que tales partículas tienen sobre la luz.

El objetivo principal es que sistema de medición pueda medir niveles de turbidez del agua de valor bajo a valor alto, valores que van desde 0 FTU (NTU) hasta 1000 FTU (NTU). El LED IR y la red de fotodiodos están dispuestos de tal manera que pueden admitir dos de los estándares de medición de turbidez más reconocidos: ISO7027 (relación y no tasa) y el método GLI. Con una calibración de tres puntos, la precisión típica que puede lograr el sistema es de  $\pm 0.50$  FTU o  $\pm 5\%$  de la lectura, lo que sea mayor. Esta precisión combinada con el nivel de ruido de 0.05 FTU hace que las mediciones obtenidas con este sistema sean muy confiables.

La unidad de medida adoptada por el Estándar ISO es el FTU (Unidad de Turbidez de la Formazina) que es idéntica al NTU (Unidad Nefelométrica de Turbidez).

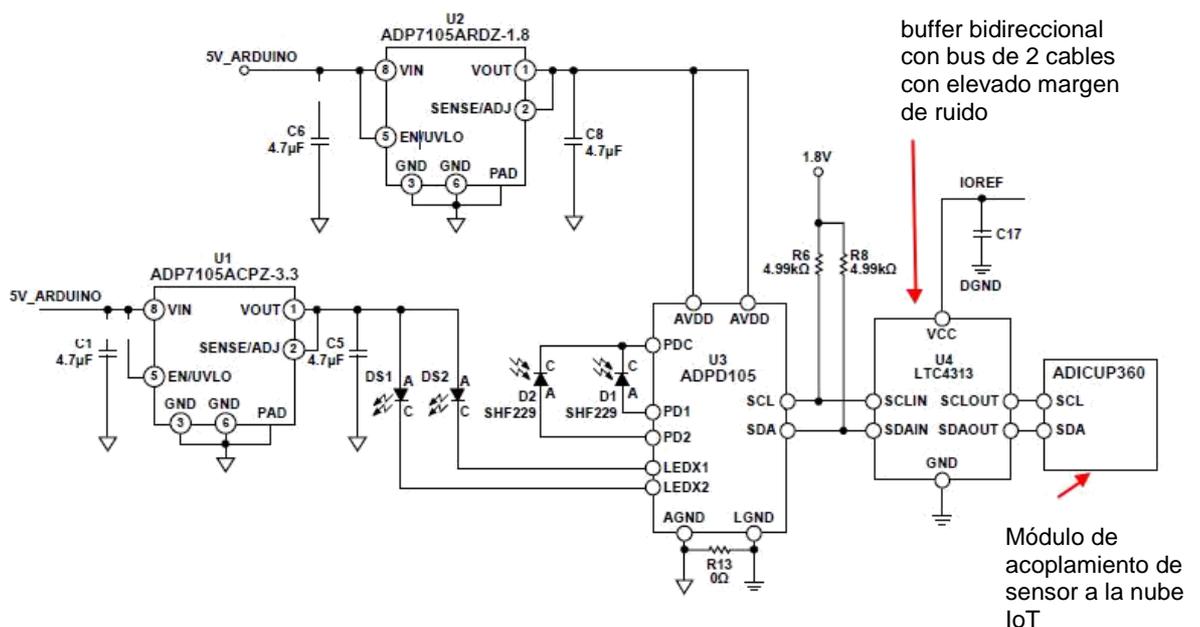


Figura 19.- Diagrama en bloque simplificado del dispositivo de medición de Turbidez

### **3.10.7.- Medición de Turbidez**

Como se ha manifestado anteriormente, un indicador importante de la calidad del agua en diferentes usos es la presencia de sólidos dispersos y partículas que no se encuentran en una verdadera solución, pudiendo incluir limo, arcilla, algas, otros microorganismos, materia orgánica y otras partículas diminutas. La turbidez es una característica cualitativa identificada por cómo estos sólidos suspendidos obstruyen la transmisión de la luz. Por eso es que la turbidez no es una medida directa de las partículas suspendidas en el agua, sino una medida del efecto de dispersión que dichas partículas tienen sobre la luz.

### **3.10.8.- Controlador de LED**

El circuito de la Figura 19) anterior utiliza el ADPD105 altamente eficientes como controladores de LED, con un núcleo de temporización totalmente integrados, disponiendo de gran capacidad de rechazo de luz ambiental en su clase sin la necesidad de filtros ópticos de fotodiodo, además tiene tres drivers led de 370 mA, pudiendo manejar en forma flexible, múltiples pulsos cortos de LED por muestra óptica, cada uno con un convertidor analógico a digital (ADC) de 14 bits integrado y un acumulador de ráfaga de 20 bits que funciona con controladores de diodos de emisión de luz flexibles (LED). Funciona como un transceptor óptico completo que estimula dos emisores de infrarrojos de 860 nm (DS1 y DS2) y fotodiodos de PIN de silicona (D1 y D2). Los datos recibidos de los fotodiodos miden la cantidad de energía dispersada a medida que pasa a través de la solución bajo prueba. Las soluciones de turbidez de menos de 1 FTU introducen poca o ninguna obstrucción a la luz; por lo tanto, el efecto de dispersión medido es despreciable. Con un aumento en la turbidez, el número de sólidos suspendidos también aumenta, lo que dificulta el haz de luz y dispersa parte de la energía en el proceso. La relación proporcional entre la turbidez y la luz dispersada es el principio subyacente utilizado en la mayoría de las técnicas de medición de turbidez.

### **3.10.9.- Rechazo de luz ambiental**

El ADPD105 opera en dos ranuras de tiempo independientes, Timeslot A y Timeslot B, que se llevan a cabo de forma secuencial. Cada impulso de LED coincide con un período de detección, de modo que el valor detectado representa la carga total adquirida en el fotodiodo en respuesta solo al impulso de LED correspondiente. La carga, como la luz ambiental, que no corresponde al pulso del LED, se rechaza. Esta característica de ADPD105 hace que el circuito sea robusto en diferentes condiciones de iluminación.

La ruta completa de la señal desde la estimulación de LED hasta la captura y el procesamiento de datos se ejecuta secuencialmente durante cada intervalo de tiempo. Cada intervalo de tiempo tiene una ruta de datos independiente que utiliza configuraciones independientes para el controlador de LED, la configuración del extremo frontal analógico (AFE) y los datos resultantes. El circuito impulsa un impulso de 100 mA al LED durante 2  $\mu$ s correspondientes a una luz emitida de 860 nm. La carga correspondiente a un LED específico se acumula en el fotodetector, y esa carga se digitaliza dentro del ADPD105. Para aumentar la resolución de la señal, el motor digital del ADPD105 promedia 16 pulsos subsiguientes.

### **3.10.10.- Consideraciones de alimentación y digitales**

El circuito de la Figura 19), utiliza dos reguladores lineales de baja caída (LDO) ADP7105 con diferentes salidas de voltaje de suministro fijo (1.8 V y 3.3 V) . La salida de 1.8 V alimenta el ADPD105 y la salida de 3.3 V desvía los LED. El ADP7105 proporciona muy buen ruido (15  $\mu$ V rms) y regulación de línea ( $\pm$  0.015%), lo cual es fundamental para garantizar que la intensidad de la luz sea repetible para cada muestra de medición. Estos factores contribuyen a las mediciones de turbidez rápidas (<12 seg) y precisas del medidor que se presenta.

### **3.10.11.- Estándares de medición de turbidez**

La Organización Internacional de Normalización (ISO) desarrolló un estándar de diseño conocido como ISO7027 Calidad del agua: determinación de la turbidez, que es mejor conocido por su requerimiento de una fuente de luz monocromática. La mayoría de los instrumentos que cumplen con esta norma utilizan una fuente de luz LED de 860 nm y un detector primario en un ángulo de 90°. Se permiten ángulos de detección adicionales, como un detector en un ángulo de 180°, para aumentar el rango de los niveles de turbidez medibles.

Para turbidez entre 0 FTU y 40 FTU, el detector de 90 ° proporciona la respuesta más lineal a la dispersión. A bajos niveles de turbidez, las partículas son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la luz incidente; por lo tanto, exhiben una distribución de dispersión simétrica. A medida que el número y el tamaño de los sólidos suspendidos aumentan dentro de este rango, el detector de 90 ° recibe una cantidad linealmente proporcional de luz dispersada. Este método también se conoce como la norma ISO7027 debido al uso de un solo detector.

Los niveles más altos de turbidez en el rango de 40 FTU a 4.000 FTU requieren un detector adicional para obtener la misma respuesta lineal que el método de no-ratificación. Las partículas más grandes presentes en estos tipos de soluciones exhiben una distribución de dispersión de luz asimétrica que resulta en una luz dispersada hacia adelante de mayor intensidad. El método de relación ISO7027 del circuito propuesto utiliza la relación del detector de 90° y el detector de 180° para medir los niveles de turbidez teóricamente hasta 4.000 FTU.

### **3.10.12.- Implementación ISO7027 No relacional**

El circuito de la Figura 19), puede admitir hasta cuatro fotodetectores y tres fuentes de luz LED. Para implementar un método de medición sin relación con la norma ISO7027, el circuito utiliza dos LED de infrarrojos y dos fotodetectores. El circuito del núcleo del ADPD105 estimula los LED y mide el retorno en el bloque analógico a través de los dos fotodetectores. Los LED se estimulan en dos intervalos de tiempo diferentes, y estos intervalos de tiempo se llevan a cabo de forma secuencial.

La ruta completa de la señal desde la estimulación del LED hasta la captura y el procesamiento de datos se ejecuta durante cada intervalo de tiempo, lo cual es fundamental para evitar que los dos LED interfieran entre sí. Durante la ranura de tiempo A, se estimula el LED2, y la luz dispersada correspondiente se detecta utilizando el detector de 90°, D2. Lo mismo sucede con LED1 para ranura de tiempo B usando el detector D4. Solo se necesita un intervalo de tiempo para realizar una medición sin relación. Sin embargo, debido a que la red CN-0409 de LED y fotodetectores está dispuesta de tal manera que otro punto de datos se puede extraer de otra ranura de tiempo, ese punto de datos también se usa. La medición final de FTU se calcula de la siguiente manera:

$$FTU = m\sqrt{(D2^2 + D4^2)} + b \quad (7)$$

donde:

m es la pendiente obtenida de la calibración (FTU / LSB).

D2 es el código del Detector D2 durante el intervalo de tiempo A (LSB).

D4 es el código del Detector D4 durante el intervalo de tiempo B (LSB).

b es la intercepción obtenida de la calibración (FTU).

### 3.10.13.- Implementación ISO7027 Relacional

El circuito propuesto, implementa un método de relación ISO7027 que es similar a la implementación sin relación de nivel, pero con un detector adicional de 180°.

Se requiere un detector adicional para medir los niveles de turbidez superiores a 100 FTU porque las partículas grandes presentes en estas soluciones exhiben una distribución asimétrica de la luz dispersada. El circuito propuesto utiliza la relación del detector de 90° sobre el detector de 180° para extender el rango lineal de sus mediciones de turbidez.

La medición final de FTU se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$FTU = m\sqrt{a^2 + b^2} \quad (8)$$

donde:

m es la pendiente obtenida de la calibración (FTU / LSB).

x es la relación del código del detector de 90° sobre el código del detector de 180° durante el intervalo de tiempo A.

y es la relación del código del detector de 90° sobre el código del detector de 180° durante el intervalo de tiempo B.

b es la intercepción obtenida de la calibración (FTU) .

## Capítulo N°4.- Diseño de un Medidor Multiparamétrico de Variables Ambientales

A continuación se presentan diagramas en bloque de la ingeniería y el diseño de dispositivos electrónicos que conforman un medidor multiparamétrico de variables Ambientales en agua o en soluciones acuosas. Los diseños sectoriales de una variable por vez presentados en los **puntos anteriores, correspondientes a medición de temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, pH y turbidez**, se integran en un único diseño utilizando componentes electrónicos de última generación. Se aplican en su totalidad lo expresado en los **puntos 1) y 2) anteriores**, logrando una síntesis de los dispositivos electrónicos individualmente diseñados en un único dispositivo.

Los sensores a utilizar en esta etapa de diseño integral son los mismos que los ya presentados, sin perjuicio que al momento de la construcción, calibración, ensayos y pruebas puedan ser sustituidos por otras marcas de sensores.

Si bien esto dependerá de la conveniencia técnica y económica para una elección final, no cambia el diseño realizado, pudiéndose incorporar cualquier tipo de sensor siempre que satisfaga con los requisitos de interfaz y sensado según las variables ambientales a medir.

Por otra parte, el diseño integral podrá ser utilizado en otras aplicaciones en relación con mediciones de variables en diferentes ámbitos, como es el caso de aire y suelos. La única adaptación que se deberá realizar es el cambio del firmware para parametrizar el equipo de medición según las nuevas variables a medir y ámbitos de aplicación.

### 4.1- Descripción del proyecto.

Es un sistema de adquisición y procesamiento multiparamétrico de variables ambientales pudiendo medir en campo y luego enviar la información en forma remota a una computadora tipo PC o notebook, o un celular mediante un módulo GSM/GRPS, e incluso mediante un módulo IoT, Internet of Things-Internet de las cosas, a la nube informática. En el caso específico de aplicación en soluciones acuosas o en agua, puede medir hasta cinco variables ambientales, quedando disponibles canales de medición adicionales para incorporar alguna variable de interés. En general los canales de entrada a la placa principal del sistema de medición, procesamiento y control son idénticos, pero se pueden adaptar las entradas según las características de funcionamiento de cada tipo de sensor de campo.

Las variables a medir con un único dispositivo electrónico son temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, pH y turbidez a partir del tratamiento individual dado en los puntos anteriores y de tratamiento general dado en los puntos 1) y 2) anteriores.

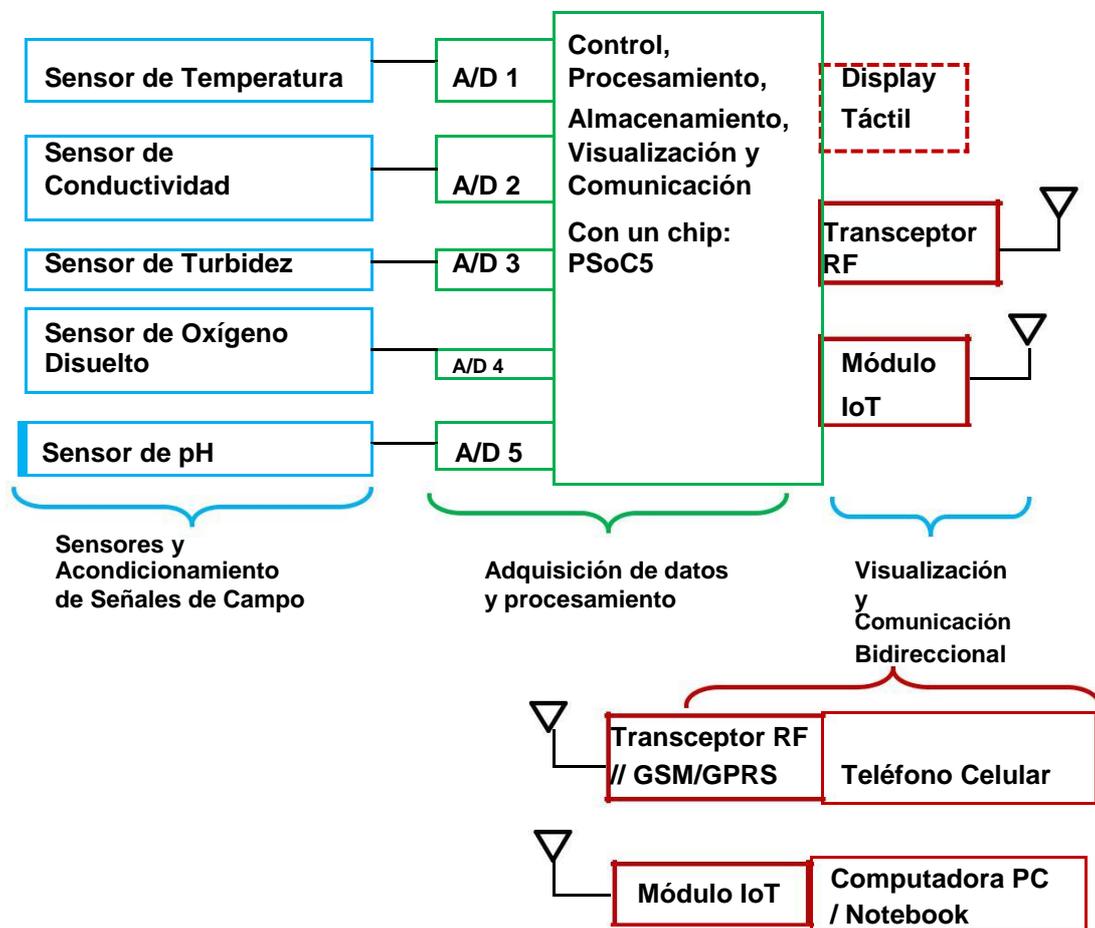
Los valores obtenidos en tiempo real se pueden enviar hacia una PC y armar una base de datos en una planilla de Excel, llevando así un registro de las lecturas realizadas en campo con capacidad de procesamiento de las variables y su interrelación.

De manera que, el objetivo principal es disponer de un medidor portátil y robusto para trabajo en campo al cual se conectan los 5 sensores para agua en canales asignados para tales fines en la placa principal y en el controlador utilizado.

En el medidor de campo se podrán visualizar los valores que dan los sensores de manera instantánea, activando o desactivando cada sensor de manera independiente.

Está pensado para que el usuario pueda medir una o las cinco variables físicas mencionadas anteriormente del agua. Todo se opera desde una pantalla táctil programada permitiendo una operación práctica, intuitiva y simple para el usuario. Un segundo dispositivo tiene la finalidad de receptor/transmisor, e interfaz conectado por puerto USB a una PC con Excel para ingresar los resultados obtenidos en campo. La transferencia de datos entre el dispositivo principal (emisor) y el receptor se tiene previsto realizar a través de módulos incorporados GSM por mensajes de texto SMS cuando el usuario decida enviar los valores de lecturas para registrarlos pulsando un botón en la pantalla táctil. Se eligió SMS para una mejor cobertura en lugares remotos (de baja señal o sin internet). Ambos dispositivos se alimentan eléctricamente con baterías recargables de Iones de Litio (LIPO).

En la Figura 20) siguiente, se ilustra el funcionamiento del sistema de adquisición de parámetros ambientales en operación de campo:



**Figura N°20.- Diagrama en Bloques del Sistema de Medición Multivariables Ambientales**

Lo expresado gráficamente en la Figura 20) anterior tiene una correspondencia operativa de cómo sería el funcionamiento del sistema de medición, de variables ambientales en el agua así como el procesamiento en una PC o en un celular, generando una planilla y gráficos en Excel o una base de datos para procesamiento estadísticos. Esto se muestra en la Figura 21) siguiente

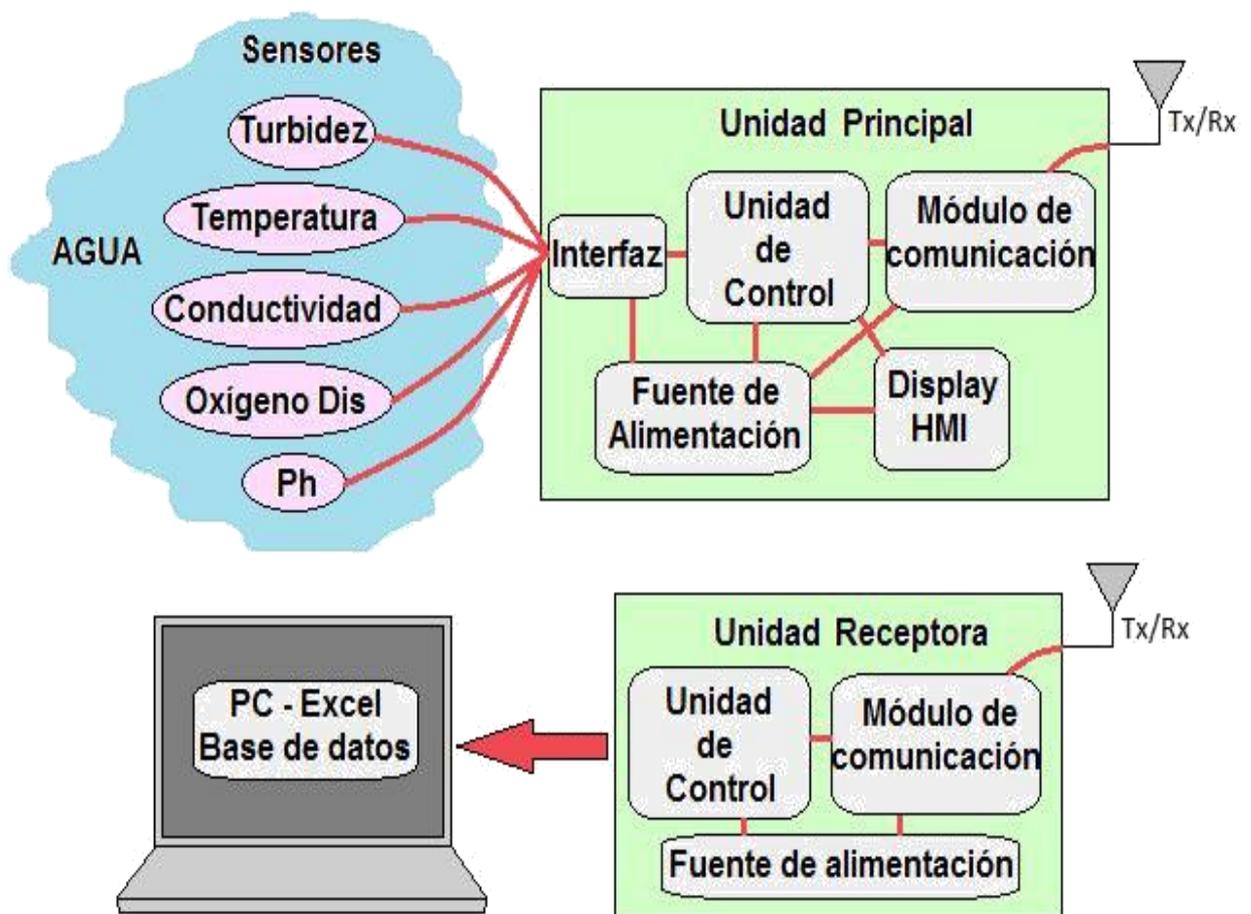


Figura 21.- Funcionamiento Operativo del Sistema de Medición Multivariable en Agua

#### 4.2- Descripción del diseño de los dispositivos electrónicos. Tecnología de los elementos utilizados. Montaje superficial y BGA.

El diseño del dispositivo de medición fue desarrollado en función de los parámetros físicos del agua a medir y procesar, luego visualizarlos en pantalla táctil, almacenar los valores medidos, y por último transmitirlos en forma remota a un celular o PC, para conformar base de datos de procesamiento en tiempo real y diferido. Se seleccionaron cuatro sensores analógicos y un sensor digital.

##### 4.2.1.- Unidad de medición y control

Se observa en la **Figura 22.- Diseño de Dispositivo Electrónico Integral del Medidor de Variables Ambientales** siguiente, que la unidad que controla el dispositivo principal que realiza las mediciones y procesamiento es un potente chip programable **CY8C5888LTI-LP097 PSoC** de la firma **CYPRESS**. Tiene un microcontrolador con arquitectura de 32-bit ARM Cortex-M3 que trabaja con una frecuencia máxima de operación de 80 MHz.

El PSoC® 5LP es un verdadero sistema programable en un chip, integrando periféricos analógicos y digitales configurables, memoria y un microcontrolador de 32 bit multinúcleo. La arquitectura PSoC 5LP mejora el rendimiento a través de:

- Core-ARM Cortex-M3 de 32 bits más controlador DMA y procesador de filtro digital, hasta 80 MHz
- Potencia ultra baja con el rango de voltaje más amplio de la industria
- Los periféricos digitales y analógicos programables permiten funciones personalizadas
- Tiene enrutamiento flexible de cualquier función periférica analógica o digital a cualquier pin

Los dispositivos PSoC emplean una arquitectura de sistema en chip altamente configurable para el diseño de control integrado. Integran circuitos analógicos y digitales configurable, controlados por un microcontrolador en chip. Un solo dispositivo PSoC puede integrar hasta 100 dispositivos digitales y funciones periféricas analógicas, lo que reduce el tiempo de diseño, el espacio de la placa, el consumo de energía y el costo del sistema, al mismo tiempo que mejora la calidad del sistema.

Es notable el poder de síntesis electrónica que se realiza con este chip programable en comparación con los diferentes dispositivos diseñados en los puntos anteriores.

La totalidad de elementos y componentes electrónicos utilizados en los diseños sectoriales para la medición de cada una de las variables involucradas están integrados en el PSoC5, a excepción del módulo de comunicación que es externo y desde luego la fuente de alimentación.

**En la Figura 22 se pueden identificar las variables medidas a través de los bloques °C (temperatura), pH, Turb. ( turbidez), OD( oxígeno disuelto), y Cond. (conductividad).**

Se eligió el chip programable PSoC5 ( *Programmable System on Chip* de ahí sus siglas **PSoC**) por su construcción integrada con una gama de módulos de lógica combinatorial programables todo en un chip que lo hacen ideal para las aplicaciones requeridas en el proyecto, como el procesamiento y control de las señales de los sensores, operación del módulo GSM y manejo de pantalla HMI.

Se diseñó un sistema de adquisición para las señales de los sensores analógicos (sensor de pH, sensor de conductividad, sensor de turbidez y sonda de saturación de oxígeno disuelto) que consiste en un amplificador operacional en configuración emisor seguidor (buffer) para cada canal donde se conecta cada sensor. Se usa esta configuración por su alta impedancia de entrada.

Un multiplexor de cuatro canales realiza la selección del canal para el conversor Analógico/Digital Delta Sigma, que tiene una configuración de conversión particular para cada uno de ellos, porque no todos los sensores entregan a su salida iguales niveles de señal. Entonces se ajusta el rango de conversión para aprovechar la escala y resolución.

Una vez digitalizada la señal se promedia el valor en un número arbitrario de mediciones para darle estabilidad y repetitividad a la lectura.

Por medio de un módulo UART se realiza comunicación serial para enviar los datos de lectura convertidos en cadena de caracteres y presentarlos en un display táctil HMI (*Human Interface Machine*) desde el cual se permite operar el sistema, con la posibilidad de activar o desactivar la entrada de cada canal de sensor independientemente de los demás.

El display utilizado es una pantalla táctil de 3.2" HMI NEXTION, se eligió porque tiene su propio microcontrolador con entorno de programación propio y no genera gasto de recursos al chip programable PSoC, además tiene comunicación serial permitiendo ahorro de pines (*sólo utiliza dos pines: Rx y Tx*).

Para transmitir los valores de lectura de los parámetros del agua se escogió un módulo GSM SIM800L de SIMCOM. La comunicación entre éste módulo y el microcontrolador es por medio de comandos AT enviados por otro módulo de comunicación asincrónica UART en formato de cadena de caracteres. Desde el GSM se envían las lecturas en SMS hacia el receptor, ya que cuenta con una SIMCard.

El PCB del dispositivo, de dimensiones 80 x 90 mm a fabricarse en placa de fibra de vidrio a doble capa de cobre, se diseñó con el software ALTIUM Designer17, con utilización de componentes SMD (*dispositivos de montaje superficial*) pasivos y activos en medida 1206, para reducir las dimensiones de la placa y por ende todo del dispositivo con el propósito de terminar en un producto práctico portátil, compacto y de dimensiones reducidas ideal para trabajar en campo.

El diseño utiliza como fuente de alimentación general una batería recargable de ion de Litio de 3 celdas con tensión máxima de 12,6V y capacidad de corriente 1300mAh. Se eligió éste tipo de baterías por sus reducidas dimensiones, altas prestaciones y ser apto para energizar un equipo portátil.

Para adaptar los niveles de tensión se utilizan dos fuentes conmutadas reductoras DC/DC **LM2596** en encapsulado D2PAK que utiliza una reducida cantidad de componentes y conmutan a una frecuencia de trabajo de 150KHz con un gran rendimiento, del orden del 92%, que permite mayor autonomía de batería.

Uno de los convertidores DC/DC está configurado para entregar a su salida tensión de 5V DC y hasta 3A de corriente para alimentar todo el dispositivo, a excepción del módulo GSM que trabaja con menor nivel de tensión. Para ello se empleó un segundo convertidor DC/DC configurado para entregar 4V DC y 3A.

Se montará todo el conjunto en un gabinete plástico robusto de dimensiones 200 x 113 x 35 mm, con marco impreso en 3D para sujeción del display HMI y se utilizarán conectores tipo BNC y de tipo Canon para conexión de los sensores, cuidando los detalles de cableado y montaje siguiendo las reglas del buen arte.

#### **4.2.2.- Unidad de recepción de datos/ e interfaz a PC:**

El dispositivo receptor de los mensajes de textos en formato SMS con los datos de lecturas de los parámetros del agua consiste en un microcontrolador ATMEGA 328 Arduino de 8 bits, que trabaja a una frecuencia de 4MHz y está vinculado por comandos AT a través de comunicación serial (*por pines Rx y Tx*) con el módulo GSM SIM900i que contiene otra SIMCard y es el que recibe dicho SMS con los datos.

Este microcontrolador se programará en el entorno Arduino con un firmware desarrollado específicamente para cumplir la tarea de ser interfaz entre el módulo GSM y la PC con Software EXCEL de Office, accediendo los datos como cadena de caracteres por medio del puerto USB en comunicación serial para almacenarlos.

El conjunto del dispositivo receptor se alimenta con una batería recargable de ion de Litio de 2 celdas y tensión máxima de 8,4V de capacidad de corriente 1000mAh debido a picos de alto consumo del módulo GSM, el cual cuenta con su propio reductor de voltaje incorporado.

El receptor se montará en un gabinete plástico robusto de dimensiones 100 x 80 x 40 mm y cuenta con pulsador de encendido y apagado seguro.

Las baterías Lipo de ambos dispositivos, tanto el principal como el receptor se recargan con un práctico cargador balanceador de baterías de lones de Litio para darle una mayor vida útil al mantener las celdas balanceadas. El cargador es de la marca HobbyKing, modelo DC-4S.

#### 4.2.3.- Diagrama en bloque general del diseño. Funcionamiento global. Operación.

En la Figura 22.- Diseño de Dispositivo Electrónico Integral del Medidor de Variables Ambientales siguiente, se presenta el diseño principal del medidor multivariable en el cual se integran y sintetizan las mediciones de variables ambientales relacionada con la calidad del agua: temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, pH y conductividad. El diseño general actual, de medición de cada una de las variables mencionadas se realiza con el Software Altium y los componentes son de montaje superficial (SMD)

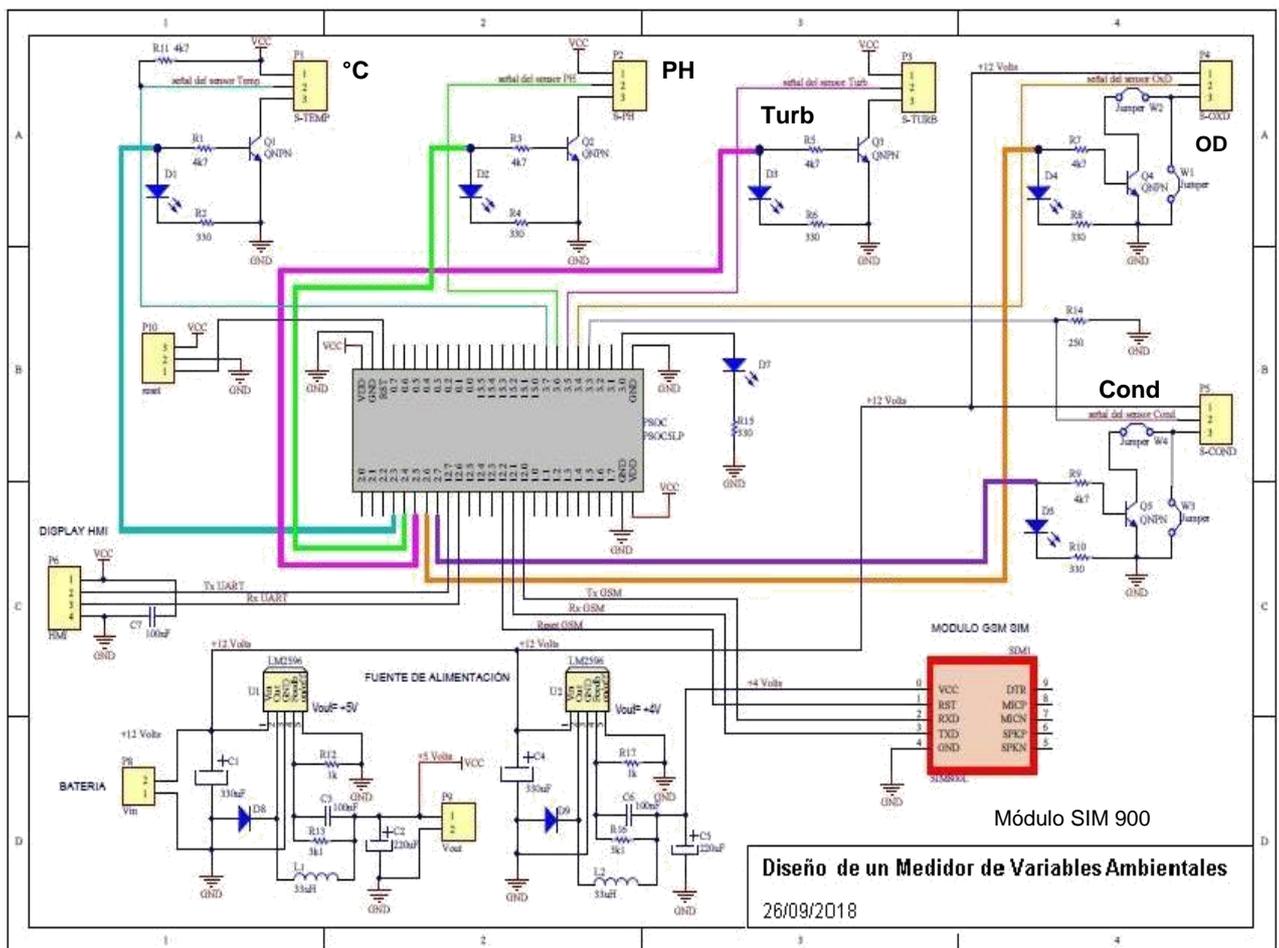


Figura 22.- Diseño de Dispositivo Electrónico Integral del Medidor de Variables Ambientales en Agua

A continuación se presentará en el entorno PSoC Creator, el diseño específico correspondiente a cada una de las variables a medir y procesar, que estarán integradas en el chip programable PSoC5, según diseño presentado en Figura 22) anterior

#### 4.2.4.- Diseño del dispositivo electrónico de medición de PH en PSoC5

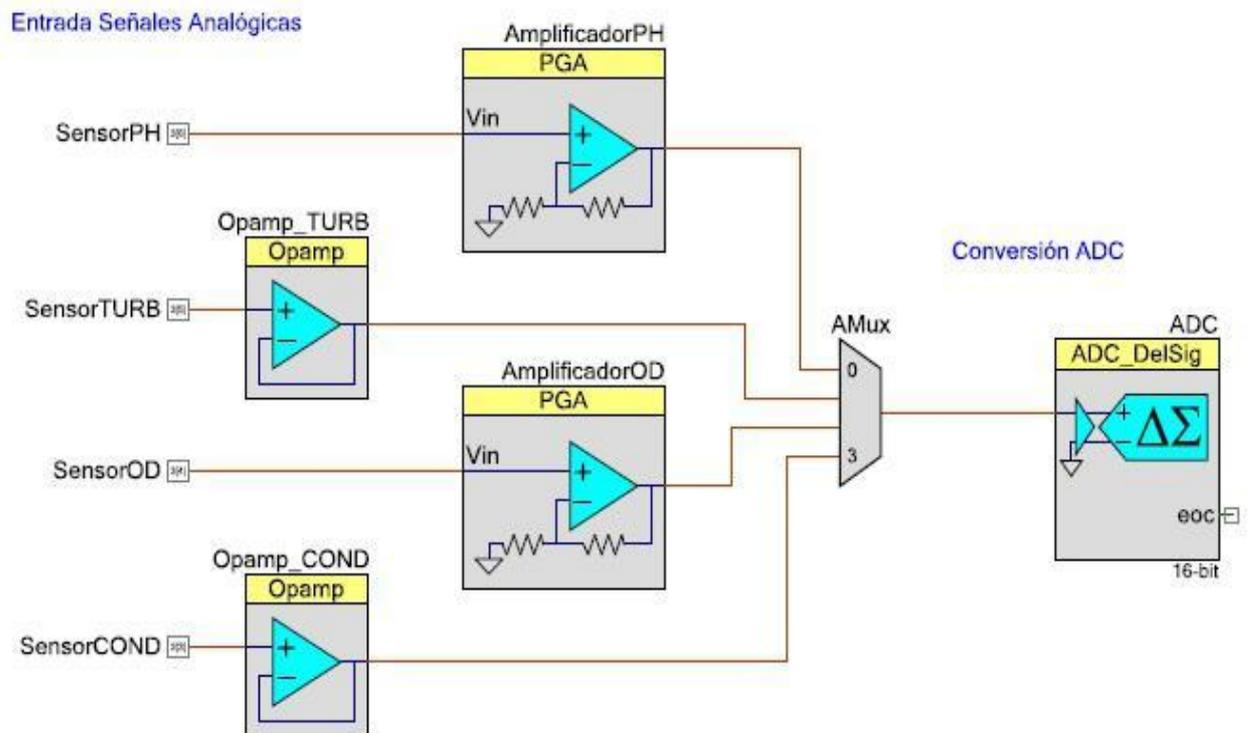


Figura N°23: Dispositivo integrado en PSoC5 para entrada de señal analógica de PH y proceso de conversión a digital.

#### 4.2.5.- Diseño del dispositivo de comunicación en Medición de Temperatura en PSoC5

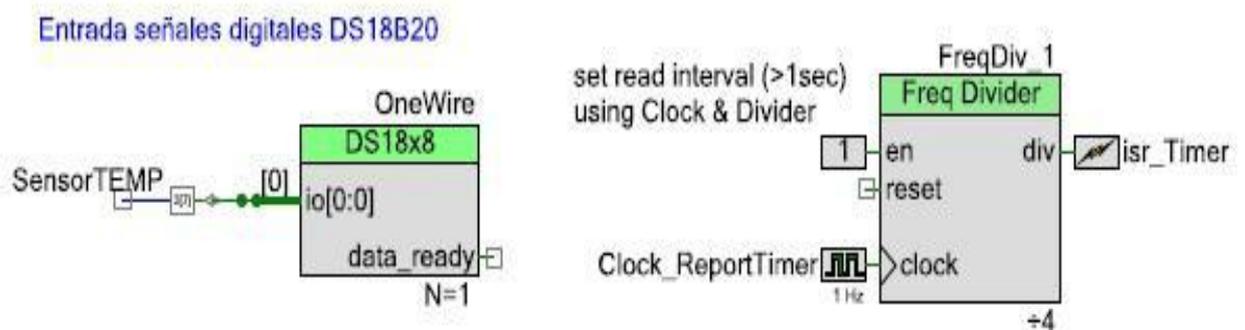


Figura N°24: Entrada digital y componente DS18x8 para la comunicación usando protocolo One-Wire en sensor de temperatura.

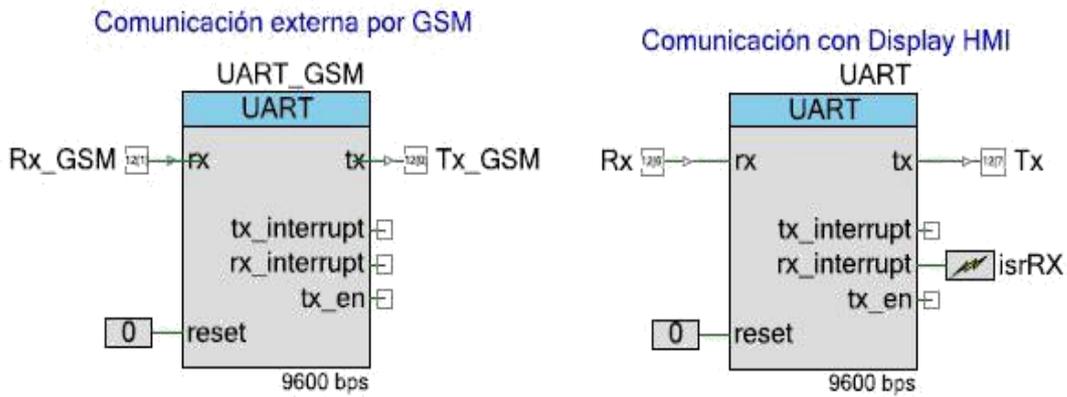


Figura N°25: Diseño de comunicación a GSM y Display HMI por módulos UART.

Salidas para activar sensores

- 202 LED\_TEMP
- 204 LED\_PH
- 205 LED\_TURB
- 206 LED\_OXD
- 207 LED\_COND

Salida para activar Modulo GSM

- 199 PIN\_OUT

Led testigo Estado Activo

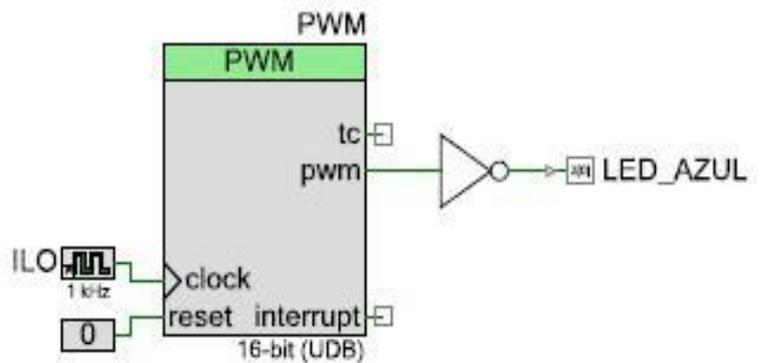


Figura N°26: Salidas digitales a transistores para activar sensores y señalizadores testigos.

#### 4.2.6.- Diseño de PCB general mediante Altium Designer 17.

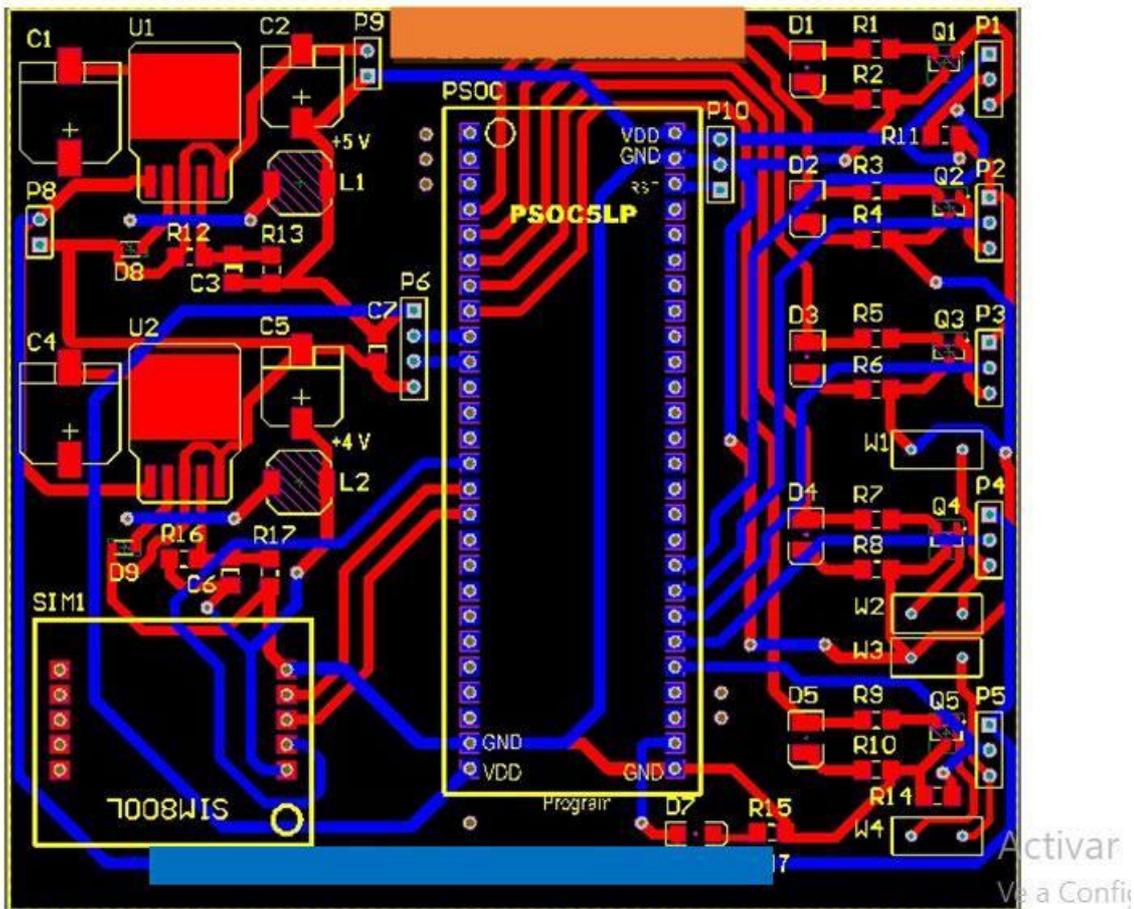


Figura N°27.- PCB general del diseño del sistema de adquisición multivariable en Altium17

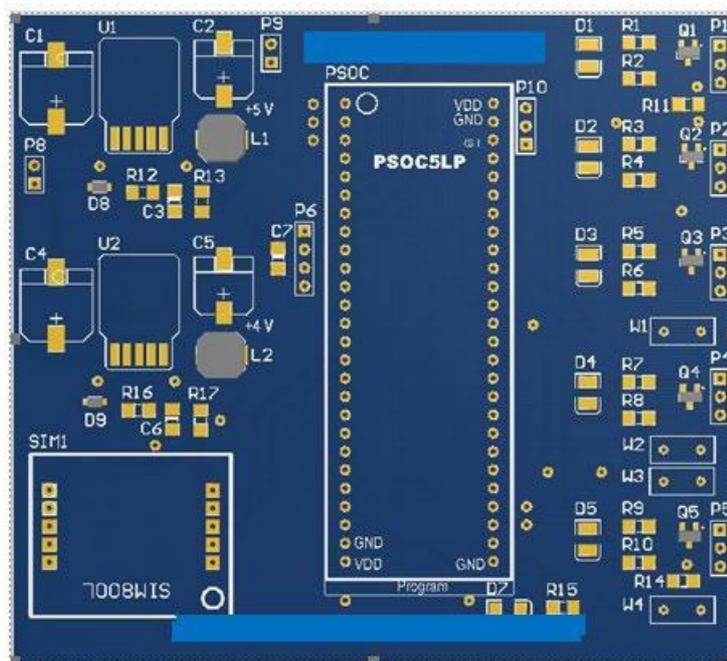


Figura N°28.- PCB en 3D, diseño final realizado en Altium17

## Capítulo N°5.- Desarrollo del Firmware

### 5.1- Diagrama de flujo del sistema informático a implementar.

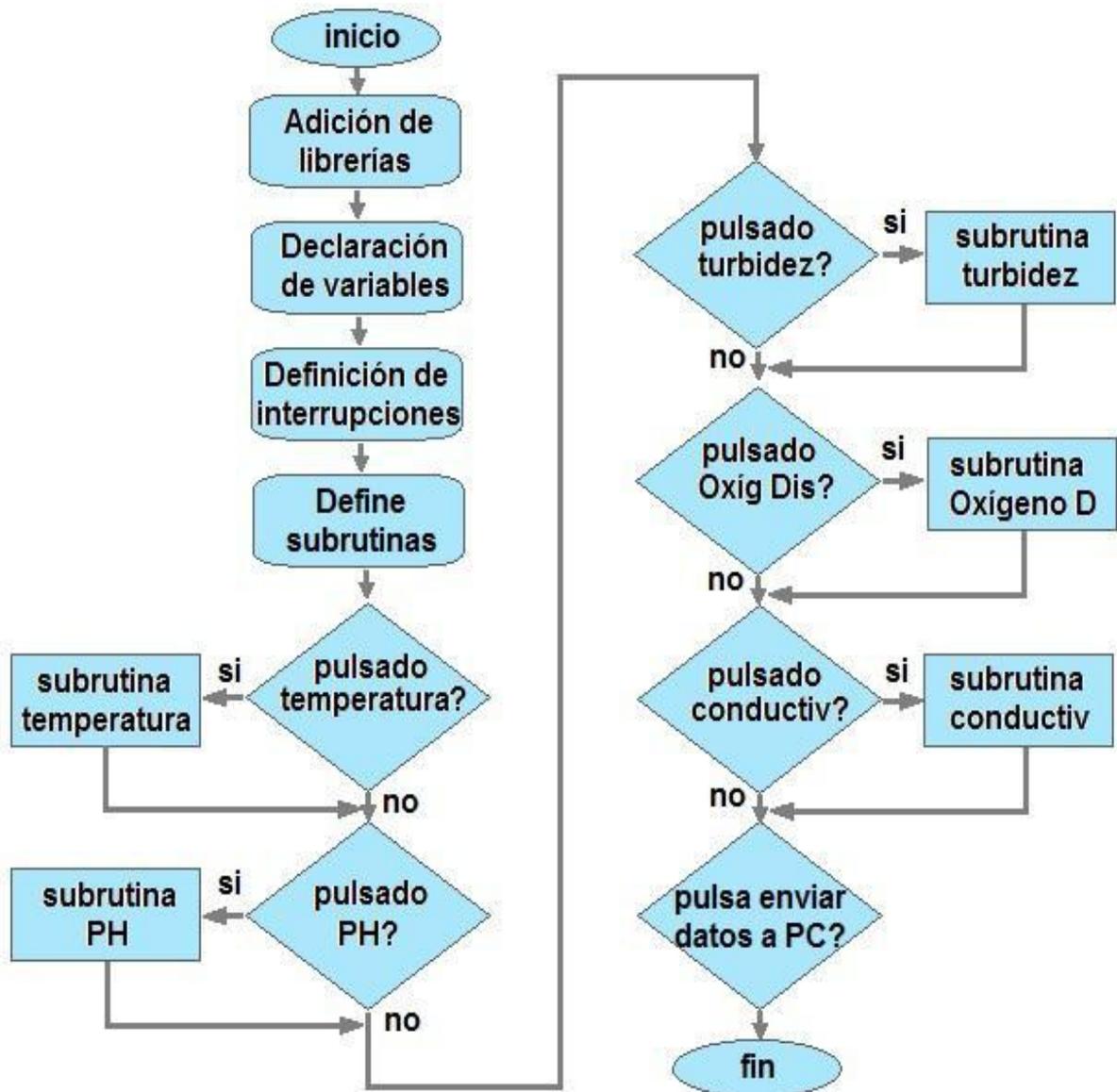


Figura N°29.- Diagrama de flujo general de la unidad principal.

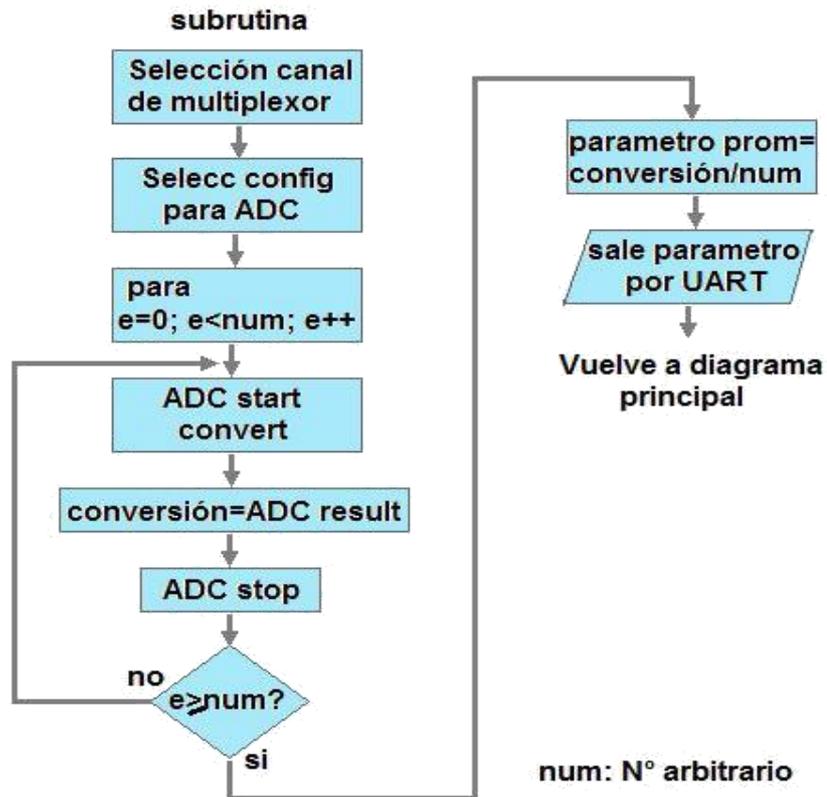


Figura N°30.- Diagrama de flujo de subrutina de lectura de sensores analógicos.



Figura N°31.- Diagrama de flujo de subrutina de interrupción disparado por UART.

## Capítulo 6: Conclusiones

Recolectando información sobre los dispositivos de medición de variables ambientales existentes en el mercado, se encontró que existen equipos para sensar y registrar variables ambientales, aunque muchos de ellos son para aplicaciones a nivel industrial, cuyo costo es elevado y se limitan a medir uno o dos parámetros.

Ante esta situación se pensó en diseñar un dispositivo electrónico que pudiera integrar en un solo equipo la medición de temperatura, turbidez, pH, oxígeno disuelto y conductividad además de tener posibilidad de transmitir esos valores obtenidos a una estación de monitoreo y control y almacenarlos en una base de datos.

Se pensó para la unidad central de medición y control el PSoC5 de Cypress por ser muy potente ya que puede integrar hasta 100 dispositivos digitales y funciones periféricas analógicas. Esto redundó en la reducción del tiempo de diseño, disminución del tamaño de la placa, una marcada disminución del consumo de energía y de costo total del sistema.

La totalidad de elementos y componentes electrónicos utilizados en los diseños sectoriales para la medición de cada una de las variables involucradas están integrados en el PSoC5, a excepción del módulo de comunicación que es externo y desde luego la fuente de alimentación.

Para la transmisión se eligió la tecnología GSM que es la que utilizan los celulares. Se optó por esta alternativa por tener una mayor cobertura geográfica sobre todo en lugares alejados de las grandes ciudades. No obstante se puede hacer también la transmisión por medio de IoT (internet de las cosas) siendo esta tecnología muy práctica ya que permite por ejemplo visualizar por el celular prácticamente en tiempo real los valores obtenidos por el Sistema de Medición. Otra de las ventajas es la posibilidad de poder tomar y procesar en simultáneo varias muestras a la vez, con lo cual se puede llegar a cubrir un área de interés importante.

Como resultado de este trabajo se puede concluir lo siguiente:

- ***Es posible diseñar un dispositivo electrónico realizado con tecnología actualizada, de bajo costo, confiable, que permita medir: temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto y turbidez de soluciones acuosas.***
- ***Los datos obtenidos de las mediciones pueden ser enviados por medio de un sistema de comunicación a una estación remota de monitoreo y control***
- ***Se puede elaborar una base de datos con todas las mediciones realizadas y luego procesar esa información con los fines que le sean de interés al usuario.***

Como propuesta de mejora se podría generalizar el sistema de medición que contemple para las variables ambientales para suelo y aire. Para ello solo se deben cambiar los sensores y ajustar el firmware correspondiente.

## Glosario

**GSM:** Global System for mobile, es un sistema estándar de comunicación para telefonía móvil

**GPRS:** General Packet Radio Service. Servicio General de Paquetes vía Radio. Es una mejora de GSM

**IoT:** Internet Of Things por sus siglas en ingles. Internet de las cosas. Se refiere a la interconexión digital de objetos con internet y a la capacidad de transferir datos a través de una red sin requerir de la acción humano a humano o humano a computadora

**PSoC5:** Programmable System on Chip de ahí sus siglas PSoC. El 5 hace referencia al número de versión.

**Firmware:** Es un sistema que se desarrolla para establecer un “firme” lazo entre el hardware y el software, se refiere a un conjunto de normas insertado en un dispositivo electrónico para que un aparato más grande ejecute una determinada función

**Sensor:** dispositivo que capta magnitudes físicas (variaciones de luz, temperatura, sonido, etc.)

**Transductor:** dispositivo que recibe energía de naturaleza física, mecánica, acústica, etc. y la transforma en otra energía de diferente naturaleza a la que recibió

**Transceptor:** dispositivo que cuenta con un transmisor y receptor y que comparten parte de la circuitería o se encuentran en la misma caja

**Display:** Dispositivo utilizado para presentar cierta información en forma visual

**Microcontrolador:** Es un circuito integrado programable capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria.

**Microprocesador:** Chip que procesa grandes volúmenes de información.

**PCB:** (Printed Circuit Board) placa de circuito impreso

**UART:** (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) Transmisor-Receptor Asincrónico Universal

**SMD:** (Surface Mounting Device) es un componente electrónico que se suelda directamente en la superficie del PCB.

**SIM Card:** (Subscriber Identify Module) Tarjeta de identificación de abonado

## **Referencias Bibliográficas**

- [1] NTC Type NK Thermometrics Epoxy – Coated Chip Thermistor. Año 2018  
<https://ar.mouser.com/datasheet/2/18/AAS-920-573E-Thermometrics-NTC-Type-NK-031918-web-1315830.pdf>
- [2] Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Año 2015  
<https://ar.mouser.com/Search/Refine.aspx?Keyword=DS18B20>
- [3] Leadless NTC Thermistor Die Suitable for Wire Bonding. Año 2017  
<https://ar.mouser.com/datasheet/2/427/ntccx00e4-769569.pdf>
- [4] PTC Thermistors, Inrush current limiter and Energy Load-Dump. Año 2017  
<https://ar.mouser.com/ProductDetail/Vishay-BC-Components/PTCEL13R251NBE?qs=%2fha2pyFaduignqifCCJCf9OXHYrLmtb9Z3p6psNYP%2fOIE9H1Kshw%252bQ%3d%3d>
- [5] Chip NTC Thermistor. Año 2017  
[https://product.tdk.com/info/en/catalog/datasheets/503021/tpd\\_commercial\\_ntc-thermistor\\_ntcg\\_en.pdf](https://product.tdk.com/info/en/catalog/datasheets/503021/tpd_commercial_ntc-thermistor_ntcg_en.pdf)
- [6] Conductivity Switch Sensor SKU: SEN0223. Año 2017.  
[https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Conductivity\\_Switch\\_Sensor\\_SKU:\\_SEN0223](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Conductivity_Switch_Sensor_SKU:_SEN0223)
- [7] Gravity: Conductivity Sensor Switch – DFRobot. Año 2018  
<https://www.dfrobot.com/product-1564.html>
- [8] Monitoreo de la calidad del agua en el río Texcoco mediante sensores selectivos de iones. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Año 2006  
Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30240301>
- [9] Sensor de Conductividad BT27i. Año 2015.  
<http://www.cma-science.nl>
- [10] CD4060BE Texas Instruments. Años 2003-2017.  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4060b.pdf>
- [11] LM2660 Switched Capacitor Voltage Converter. Texas Instruments Reguladores de voltaje de conmutación. Año 2014.  
<https://ar.mouser.com/Search/Refine.aspx?Keyword=LM2660>
- [12] Analog Dissolved Oxygen Sensor SKU: SEN0237. Año 2015.  
<https://ar.mouser.com/ProductDetail/DFRobot/SEN0237-A?qs=sGAEpiMZZMve4%2fbfQkoj%252bOt5d9PTApCOrPhQULcUxOU%3d>
- [13] CENTRE FOR MICROCOMPUTER APPLICATIONS. Año 2015  
[https://cma-science.nl/resources/dealers/es/manuals/bt\\_sensors/BT34i\\_es.pdf](https://cma-science.nl/resources/dealers/es/manuals/bt_sensors/BT34i_es.pdf)
- [14] DISSOLVED OXYGEN PROBE Model 760DOP  
[https://www.mouser.com/ds/2/43/760DX\\_datasheet-40174.pdf](https://www.mouser.com/ds/2/43/760DX_datasheet-40174.pdf)
- [15] Analog Device. Low Cost Power Instrumentation Amplifier. Año 2011  
<https://www.mouser.com/ds/2/609/AD620-877253.pdf>
- [16] Dialnet-DiseñoEImplementacionDeUnPrototipoElectronicoParaM-5767275. Año 2016  
[https://dialnet.unirioja.es/buscar/documentos?query=Dismax.DOCUMENTAL\\_TODO=Dialnet-DiseñoEImplementacionDeUnPrototipoElectronicoParaM-5767275](https://dialnet.unirioja.es/buscar/documentos?query=Dismax.DOCUMENTAL_TODO=Dialnet-DiseñoEImplementacionDeUnPrototipoElectronicoParaM-5767275)

- [17] Dialnet-OxigenoDisueltoPresentesEnLaPisciculturaBajoCondic-4414812. Año 2013.  
[https://dialnet.unirioja.es/buscar/documentos?querysDismax.DOCUMENTAL\\_TODO=Dialnet-OxigenoDisueltoPresentesEnLaPisciculturaBajoCondic-4414812](https://dialnet.unirioja.es/buscar/documentos?querysDismax.DOCUMENTAL_TODO=Dialnet-OxigenoDisueltoPresentesEnLaPisciculturaBajoCondic-4414812)
- [18] TP5551/TP5552 / TP5554 Ultra Low Noise, 3.5MHz, RRIO Zero-Drift Op-amps  
<http://www.3peakic.com.cn/Public/Uploads/files/TP5551-TP5552-TP5554.pdf>
- [19] XC6201 Series - Positive Voltage Regulators  
<https://www.torexsemi.com/file/xc6201/XC6201.pdf>
- [20] Isolated Low Power pH Monitor with Temperature Compensation. Año 2013  
<http://www.analog.com/en/design-center/reference-designs/hardware-reference-design/circuits-from-the-lab/cn0326.html#rd-overview>
- [21] ADuCRF101 Evaluation Board User Guide. Año 2013  
<https://www.google.com.ar/search?q=ADuCRF101+Evaluation+Board+User+Guide&og=ADuCRF101+Evaluation+Board+User+Guide&aqs=chrome..69j57.1200j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- [22] AD7792/AD7793. Año 2007  
<http://www.analog.com/en/products/ad7792.html#product-overview>
- [23] AD8603\_8607\_8609-877965. Precision Micropower, Low Noise CMOS, Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifiers. Año 2008  
[https://ar.mouser.com/datasheet/2/609/AD8603\\_8607\\_8609-877965.pdf](https://ar.mouser.com/datasheet/2/609/AD8603_8607_8609-877965.pdf)
- [24] ADI\_CN0398. Soil Moisture and pH Measurement System with Temperature Compensation. Año 2016  
[https://www.mouser.com/pdfdocs/ADI\\_CN0398.pdf](https://www.mouser.com/pdfdocs/ADI_CN0398.pdf)
- [25] TL082 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier. Año 2013  
[https://www.mouser.com/pdfdocs/ADI\\_CN0398.pdf](https://www.mouser.com/pdfdocs/ADI_CN0398.pdf)
- [26] AN-1852 Designing With pH Electrodes. Año 2013  
<http://www.ti.com/lit/an/snoa529a/snoa529a.pdf>
- [27] Medición de Turbidez en la Calidad del Agua. Año 2010  
<http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-10-01-Turbidez.pdf>
- [28] Nueva tecnología para medición de la turbidez en agua: la experiencia en la UE. DOC043.61.30350. Año 2016  
<https://www.termodinamica.cl/asset-get.download.jsa?id=51201227061>
- [29] Práctica 5 Determinación de Turbidez en Agua.  
[https://www.academia.edu/15356223/PR%C3%81CTICA\\_5\\_DETERMINACI%C3%93N\\_DE\\_TURBIDEZ\\_EN\\_AGUA](https://www.academia.edu/15356223/PR%C3%81CTICA_5_DETERMINACI%C3%93N_DE_TURBIDEZ_EN_AGUA)
- [30] Monitoreo de la calidad del agua. Año 2013  
<http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-859/maguaturbidez.pdf>
- [31] Métodos de análisis físicos y espectrofotométricos para el análisis de aguas residuales . Dialnet-MetodosDeAnalisisFisicosYESpectrofometricosParaEIA-4835509  
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835509.pdf>

[32] The Turbidity Tube: Simple and Accurate Measurement of Turbidity in the Field. Año 2006  
[http://www.virginia.edu/blandy/blandy\\_web/education/Bay/TurbidityTubeConstruction&UseMyreShaw.pdf](http://www.virginia.edu/blandy/blandy_web/education/Bay/TurbidityTubeConstruction&UseMyreShaw.pdf)

[33] Turbidimeter Design and Analysis: A Review on Optical Fiber Sensors for the Measurement of Water Turbidity. Año 2009  
<https://www.mdpi.com/1424-8220/9/10/8311/pdf>

[34] AAS-920-616A-Thermometrics-TSD-10-TurbiditySensor—1315853. Año2014  
<https://ar.mouser.com/Search/Refine.aspx?Keyword=turbidity+sensor>

[35] Low to High Level Water Turbidity Measurement System. Analog Devices. Año 2018 <https://www.digikey.com/products/es/development-boards-kits-programmers/evaluation-boards-expansion-boards-daughter-cards/797?k=Turbidity%20Measurement>

[36] Analog EC Meter SKU:DFR0300. Año 2017.  
[https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Analog\\_EC\\_Meter\\_SKU:DFR0300](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Analog_EC_Meter_SKU:DFR0300)

[37] Conductivity Electrode User Manual. Año2018  
<http://image.dfrobot.com/image/data/DFR0300/Conductivity%20Electrode%20User%20Manual.pdf>