

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño  
Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



---

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA  
ELECTRÓNICO DE MONITORIZACIÓN DE  
PARÁMETROS QUÍMICOS CON TELEMETRÍA  
APLICADA EN ACUACULTURA

---

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

presenta:

CÉSAR ALBERTO LIERA GRIJALVA

Director de tesis

Dr. Everardo Inzunza González

Ensenada, Baja California, México. Diciembre de 2015.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

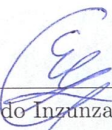
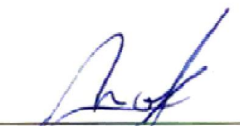
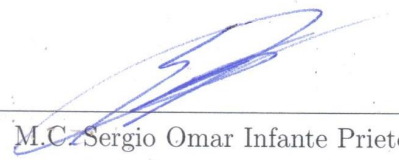
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA  
ELECTRÓNICO DE MONITORIZACIÓN DE  
PARÁMETROS QUÍMICOS CON TELEMETRÍA  
APLICADA A ACUACULTURA

TESIS

que para obtener el grado de MAESTRO en INGENIERÍA presenta:

CÉSAR ALBERTO LIERA GRIJALVA

Y aprobada por el siguiente comité:

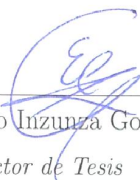
  
Dr. Everardo Inzunza González  
*Director del Tesis*  
Dr. Enrique Efrén García Guerrero  
*Co-director del Tesis*  
Dr. Oscar Roberto López Bonilla  
*Miembro del Comité*  
Dr. Marcial Castro Muñoz  
*Miembro de Comité*  
M.C. Sergio Omar Infante Prieto  
*Miembro del Comité*

Diciembre de 2015

**RESUMEN** de la tesis de **César Alberto Liera Grijalva**, presentada como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA, del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de la UABC. Ensenada, B. C. México, Diciembre de 2015.

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE MONITORIZACIÓN DE PARÁMETROS QUÍMICOS CON TELEMETRÍA APLICADA EN ACUACULTURA**

Resumen aprobado por:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Everardo Inzunza González

*Director de Tesis*

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Enrique Efraín García Guerrero

*Codirector de Tesis*

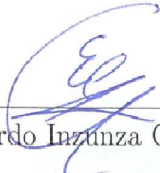
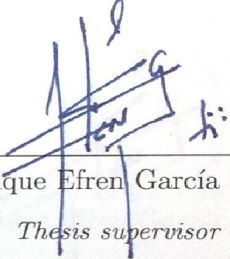
El presente trabajo de tesis propone el diseño e implementación de un sistema electrónico para la medición de variables químicas, tales como amoníaco  $\text{NH}_3$ , pH, oxígeno disuelto, además de la temperatura y la salinidad presentes en los procesos de acuacultura. El sistema está compuesto por un microcontrolador ATMEGA 2560, en el cual se adapta un módulo permitiendo la capacidad del envío inalámbrico de datos por red Zigbee, puertos de comunicación USB, USART, además del desarrollo de la etapa de acondicionamiento de la señal que proviene de los sensores químicos, posteriormente estos datos son guardados y desplegados en una interfaz gráfica sencilla para el usuario. Para verificar la viabilidad de la comunicación en tiempo real y la precisión del dispositivo, se realiza el correspondiente análisis en tiempo de toma de muestras y variaciones de la medición respecto a sistemas comerciales. El sistema desarrollado se prueba experimentalmente en los laboratorios de cultivo de totoaba y almeja generosa de la UABC y además en una empresa local dedicada al cultivo y producción de almeja generosa, específicamente en esta empresa el instrumento desarrollado se probó durante 1 año realizando mediciones continuas las 24 horas del día.

**Palabras clave:** Microcontrolador, sensores químicos, comunicaciones inalámbricas, acuacultura.

**ABSTRACT** of the thesis of **CÉSAR ALBERTO LIERA GRIJALVA**, presented as a partial requirement to obtain the degree of MASTER in ENGINEERING, of the program of MSc and PhD in Sciences and Engineering of UABC. Ensenada, B. C., Mexico, December 2015.

## **DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ELECTRONIC MONITORING SYSTEM FOR CHEMICAL PARAMETERS WITH TELEMETY APPLIED IN AQUACULTURE**

Abstract approved by:

|                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>_____<br>Dr. Everardo Inzunza González<br><i>Thesis supervisor</i> | <br>_____<br>Dr. Enrique Efrén García Guerrero<br><i>Thesis supervisor</i> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

This thesis work presents the design and implementation of an electronic system for the measurement of chemical variables ammonia  $\text{NH}_3$ , pH, dissolved oxygen, temperature and salinity in aquaculture laboratories. The system comprises a microcontroller ATMEGA 2560, in which a module is adapted allowing wireless data communication using Zigbee protocol, USB communication ports, USART, and the conditioning stage to adapt the signal coming for the chemical sensors, these data are then stored and displayed in a simple graphical interface to the user. To verify the feasibility of real-time communication and the precision of the device, the corresponding analysis is performed on time sampling and measurement variations regarding commercially available systems. The system developed is tested experimentally in laboratory for totoaba and geoduck at UABC, also in a local company dedicated to the produccion of geoduck, specifically in the company the system was tested for 1 year making continuous measurements 24 hours a day.

**Keywords:** Microcontroller, chemical sensors, wireless communications, aquaculture.



*A mis padres: Adalberto Liera Nuñez y  
Griselda Martina Bojorquez Grijalva*

# Agradecimientos

*A **DIOS**, por tenerme siempre bajo su protección y por todas las bendiciones que me ha dado todos los días de mi vida.*

*Al **Dr. Enrique Efrén García Guerrero**, por haberme dirigido en la realización del presente trabajo de tesis de maestría, por su amistad, la atención y el apoyo incondicional que me ha brindado.*

*Al **Dr. Everardo Inzunza González**, por su amistad, atención y por sus enseñanzas que me permitieron desarrollar con éxito el presente trabajo de tesis de maestría.*

*Al **Dr. Juan Iván Nieto, Dr. Oscar Roberto López Bonilla, M.C. Sergio Omar Infante Prieto**, un especial agradecimiento por sus comentarios muy acertados en las presentaciones y revisiones del presente trabajo de tesis de maestría.*

*A mi Padre **Adalberto Liera Nuñez**, sin tu apoyo y guía, no hubiese hecho realidad este sueño. Gracias por todo papá!.*

*A mi madre **Griselda Grijalva Bojorquez Grijalva**, sin tu apoyo al escucharme mis avances no hubiese hecho realidad este sueño. Gracias por todo mamá!.*

*A mi **hermana, Montserrat Liera Grijalva**, por ser ejemplo de vida, por su apoyo y sus consejos.*

*A mi amigo **Andrés Navarro Rodríguez**. un especial agradecimiento por su valiosa amistad y apoyo incondicional. Gracias amigo!.*

*Al **CONACyT**, que con su programa de becas me proporcionaron los recursos necesarios durante esta etapa importante en mi vida profesional.*

*A nuestra alma mater: **Universidad Autónoma de Baja California**, que es como mi segundo hogar y donde se me ha permitido desarrollarme profesionalmente.*

*Al **coordinador de posgrado, Dr. Juan de Dios Sánchez**, por sus asesorías administrativas.*

Ensenada, B. C. México.  
de Diciembre de 2015.

CÉSAR ALBERTO LIERA GRIJALVA

# Tabla de Contenido

|                                                             | Página     |
|-------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Tabla de Contenido</b>                                   | <b>i</b>   |
| <b>Resumen</b>                                              | <b>iii</b> |
| <b>Abstract</b>                                             | <b>iv</b>  |
| <b>Agradecimientos</b>                                      | <b>vi</b>  |
| <b>Lista de figuras</b>                                     | <b>x</b>   |
| <b>Lista de tablas</b>                                      | <b>xiv</b> |
| <b>I Introducción</b>                                       | <b>1</b>   |
| I.1 Motivación . . . . .                                    | 2          |
| I.2 Planteamiento del problema . . . . .                    | 2          |
| I.2.1 Descripción del problema . . . . .                    | 2          |
| I.2.2 Preguntas de investigación . . . . .                  | 3          |
| I.2.3 Delimitación del problema . . . . .                   | 3          |
| I.3 Metodología . . . . .                                   | 5          |
| I.4 Objetivos del proyecto . . . . .                        | 6          |
| I.4.1 Objetivo general . . . . .                            | 6          |
| I.4.2 Objetivos específicos . . . . .                       | 7          |
| I.5 Organización de la tesis . . . . .                      | 8          |
| <b>II Marco Teórico</b>                                     | <b>9</b>   |
| II.1 Parámetros generales en acuicultura . . . . .          | 9          |
| II.2 Teoría de sensores electroquímicos . . . . .           | 10         |
| II.2.1 Potencial de hidrógeno (pH) . . . . .                | 11         |
| II.2.2 Electrodo de pH . . . . .                            | 13         |
| II.2.3 Procedimiento de calibración de pH . . . . .         | 16         |
| II.2.4 Oxígeno disuelto . . . . .                           | 17         |
| II.2.5 Salinidad . . . . .                                  | 21         |
| II.2.6 Amoníaco . . . . .                                   | 26         |
| II.2.7 Temperatura . . . . .                                | 30         |
| II.3 Sistemas embebidos . . . . .                           | 32         |
| II.3.1 ATMEGA 2560 y tarjeta de desarrollo ARDUINO MEGA . . | 35         |
| II.4 Comunicación en sistema embebido . . . . .             | 41         |
| II.4.1 Módulo USART . . . . .                               | 42         |
| II.4.2 Comunicación I2C . . . . .                           | 42         |
| II.4.3 Puerto USB . . . . .                                 | 43         |
| II.4.4 Protocolo IEEE 802.15.4 (Zigbee) . . . . .           | 44         |
| II.5 Especies marinas a monitorear . . . . .                | 46         |
| II.5.1 Almeja generosa . . . . .                            | 46         |
| II.5.2 Langosta roja . . . . .                              | 47         |

# Tabla de Contenido (Continuación)

|            | Página                                                                                 |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| II.6       | Totoaba . . . . . 49                                                                   |
| II.7       | Conclusión . . . . . 50                                                                |
| <b>III</b> | <b>Programación e implementación del sistema embebido 51</b>                           |
| III.1      | Circuitos analógicos . . . . . 51                                                      |
| III.1.1    | Sensor de oxígeno disuelto de uso industrial . . . . . 51                              |
| III.1.2    | Sensor de pH para uso industrial . . . . . 56                                          |
| III.2      | Circuitos de comunicación serial . . . . . 60                                          |
| III.2.1    | Circuito EZO para oxígeno disuelto . . . . . 69                                        |
| III.3      | Cálculo de amoniaco libre (NH <sub>3</sub> ) . . . . . 76                              |
| III.4      | Sensor digital de temperatura . . . . . 79                                             |
| III.5      | Uso de teclado y EEPROM . . . . . 81                                                   |
| III.6      | Integración del sistema electrónico desarrollada . . . . . 84                          |
| III.7      | Conclusiones . . . . . 85                                                              |
| <b>IV</b>  | <b>Envío de datos por comunicación inalámbrica 87</b>                                  |
| IV.0.1     | Dispositivo con comunicación Zigbee . . . . . 87                                       |
| IV.0.2     | Xbee utilizado . . . . . 89                                                            |
| IV.0.3     | Módulo GSM-GPRS . . . . . 91                                                           |
| IV.1       | Implementación de la comunicación inalámbrica con dispositivo Xbee shield . . . . . 92 |
| IV.2       | Módulo GSM-GPRS para envío de alarma SMS . . . . . 93                                  |
| IV.3       | Interfaz gráfica con el usuario . . . . . 94                                           |
| IV.4       | Conclusiones . . . . . 98                                                              |
| <b>V</b>   | <b>Resultados 99</b>                                                                   |
| V.1        | Diseño de carcasa hermética . . . . . 99                                               |
| V.1.1      | Carcasa de sistema embebido desarrollado . . . . . 99                                  |
| V.2        | Versiones del sistema electrónico desarrollado . . . . . 101                           |
| V.2.1      | Primer prototipo en protoboard y pruebas de laboratorio . . . 101                      |
| V.2.2      | Pruebas experimentales en UBP e IIO UABC . . . . . 104                                 |
| V.2.3      | Pruebas experimentales en empresa Oceánica y Grupo Miramar 105                         |
| V.2.4      | Pruebas de campo con el cuarto prototipo de uso comercial . 106                        |
| V.3        | Comparación con sistemas comerciales . . . . . 108                                     |
| V.3.1      | Resultados de medición de temperatura . . . . . 112                                    |
| V.3.2      | Resultados de la medición de Oxígeno . . . . . 113                                     |
| V.3.3      | Resultados de la medición de pH . . . . . 116                                          |
| V.3.4      | Resultados de la medición de salinidad . . . . . 120                                   |
| V.3.5      | Resultados de la medición de amoniaco . . . . . 120                                    |
| V.4        | Mantenimiento de los sensores . . . . . 121                                            |
| V.5        | Conclusión . . . . . 122                                                               |

# Tabla de Contenido (Continuación)

|                                                                      | Página     |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>VI Conclusiones generales y trabajo futuro</b>                    | <b>124</b> |
| VI.1 Trabajos a futuro . . . . .                                     | 126        |
| <b>Bibliografía</b>                                                  | <b>127</b> |
| <b>A Programación de comandos de circuito EZO</b>                    | <b>134</b> |
| A.0.1 Circuito EZO de salinidad . . . . .                            | 134        |
| A.0.2 Circuito EZO para oxígeno disuelto . . . . .                   | 136        |
| A.0.3 Sensor de temperatura DS18B20 . . . . .                        | 138        |
| A.0.4 Envío de mensajes SMS . . . . .                                | 139        |
| <b>B Glosario</b>                                                    | <b>141</b> |
| <b>C Publicaciones y reconocimientos</b>                             | <b>143</b> |
| C.0.5 Publicaciones derivadas del trabajo de tesis de maestría . . . | 143        |
| C.0.6 Publicaciones en colaboración . . . . .                        | 143        |
| C.0.7 Reconocimientos . . . . .                                      | 143        |



# Lista de figuras

| Figura |                                                                                                                                                                   | Página |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1      | Esquema a bloques del proyecto propuesto. . . . .                                                                                                                 | 7      |
| 2      | Esquemático de un sensor electro-químico de oxígeno disuelto. . . . .                                                                                             | 11     |
| 3      | Valor de pH de materiales comunes. . . . .                                                                                                                        | 12     |
| 4      | Reactivos comerciales para medición de pH . . . . .                                                                                                               | 13     |
| 5      | Sensor de pH. . . . .                                                                                                                                             | 15     |
| 6      | Esquemático de circuito para medición de pH. . . . .                                                                                                              | 15     |
| 7      | Medición de conductividad. . . . .                                                                                                                                | 23     |
| 8      | Valor de constante $K$ . . . . .                                                                                                                                  | 25     |
| 9      | Distribución de amoníaco $\text{NH}_3\text{-NH}_4$ en el medio. . . . .                                                                                           | 30     |
| 10     | Ejemplo de control de temperatura en un invernadero. . . . .                                                                                                      | 32     |
| 11     | ATMEGA2560 utilizado como sistema embebido . . . . .                                                                                                              | 33     |
| 12     | LCD 20x4 utilizado en este trabajo de tesis. . . . .                                                                                                              | 37     |
| 13     | Esquemático de un teclado matricial 4x4. . . . .                                                                                                                  | 38     |
| 14     | Conexión de un ARDUINO con un teclado matricial 4x4 . . . . .                                                                                                     | 40     |
| 15     | Ejemplo esquemático con un maestro (un microcontrolador) y tres nodos esclavos (un ADC, un DAC, y otro microcontrolador) con resistencias pull-up $R_p$ . . . . . | 43     |
| 16     | ATMEGA conectado con chip FTDI para comunicación USB. . . . .                                                                                                     | 45     |
| 17     | Formas de conectar la red Zigbee. . . . .                                                                                                                         | 46     |
| 18     | Almeja generosa . . . . .                                                                                                                                         | 47     |
| 19     | Imagen de una langosta roja. . . . .                                                                                                                              | 49     |
| 20     | Imagen de una totoaba. . . . .                                                                                                                                    | 50     |
| 21     | Sensor de oxígeno disuelto para uso industrial. . . . .                                                                                                           | 52     |
| 22     | Esquemático del sensor de oxígeno disuelto para uso industrial. . . . .                                                                                           | 53     |
| 23     | Esquemático del OP-AMP AD623. . . . .                                                                                                                             | 53     |
| 24     | Circuito en PCB para AD623 con ganancia variable. . . . .                                                                                                         | 55     |
| 25     | Realización de circuito del AD620 en software Multisim. . . . .                                                                                                   | 55     |
| 26     | Sensor de pH para uso industrial. . . . .                                                                                                                         | 57     |
| 27     | Circuito compuesto de 2 etapas de acondicionamiento de señal para el electrodo de pH. . . . .                                                                     | 58     |
| 28     | Adaptador de sensor de pH para microcontrolador, fabricado por la compañía Phidgets. . . . .                                                                      | 60     |
| 29     | Circuito digital EZO para sensor de conductividad. . . . .                                                                                                        | 61     |
| 30     | Modo de comunicación continua del circuito EZO para salinidad. . . . .                                                                                            | 62     |
| 31     | Diagrama de flujo para envío y recepción de 1 dato de salinidad . . . . .                                                                                         | 64     |
| 32     | Diagrama de flujo para envío y recepción de salinidad, conductividad y TDS. . . . .                                                                               | 65     |

# Lista de figuras (Continuación)

| Figura |                                                                                                                  | Página |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 33     | Diagrama de flujo para envío y recepción de salinidad, conductividad y TDS. . . . .                              | 66     |
| 34     | Buffer utilizados para calibración del sensor de conductividad. . . . .                                          | 67     |
| 35     | Relación de calibración usando 2 puntos. . . . .                                                                 | 68     |
| 36     | Sensor de conductividad de uso comercial e industrial. . . . .                                                   | 69     |
| 37     | Esquemático del sensor de conductividad de uso comercial e industrial. . . . .                                   | 70     |
| 38     | Circuito EZO para sensor de oxígeno disuelto. . . . .                                                            | 71     |
| 39     | Figura que representa el cambio de mV del sensor de oxígeno disuelto. . . . .                                    | 71     |
| 40     | Diagrama de flujo para envío y recepción de 1 dato de oxígeno disuelto . . . . .                                 | 72     |
| 41     | Diagrama de flujo para envío y recepción de oxígeno disuelto . . . . .                                           | 73     |
| 42     | Continuación de diagrama de flujo para envío y recepción de oxígeno disuelto . . . . .                           | 74     |
| 43     | Buffer utilizados para calibración del sensor de oxígeno disuelto. . . . .                                       | 75     |
| 44     | Muestras de TAN realizadas en laboratorio de usos múltiples UABC. . . . .                                        | 76     |
| 45     | Muestras de TAN=0.25 mg/L medida con el sistema. . . . .                                                         | 77     |
| 46     | Muestras de TAN=0.5 mg/L medida con el sistema. . . . .                                                          | 77     |
| 47     | Muestras de TAN=1 mg/L medida con el sistema. . . . .                                                            | 78     |
| 48     | Muestras de TAN=2 mg/L medida con el sistema. . . . .                                                            | 78     |
| 49     | Muestras de TAN=8 mg/L medida con el sistema. . . . .                                                            | 78     |
| 50     | Sensor de temperatura DS18B20 con protección para el agua. . . . .                                               | 79     |
| 51     | Diagrama de bloques del sensor de temperatura DS18B20. . . . .                                                   | 80     |
| 52     | Diagrama electrónico utilizando Arduino y sensor de temperatura DS18B20. . . . .                                 | 80     |
| 53     | Diagrama electrónico utilizando el Arduino, teclado y LCD. . . . .                                               | 82     |
| 54     | Inicio de menú con variables registradas en EEPROM. . . . .                                                      | 82     |
| 55     | Segunda etapa de menú con variables registradas en EEPROM. . . . .                                               | 83     |
| 56     | LCD desplegando el valor de la medición continua. . . . .                                                        | 83     |
| 57     | Menú para ajuste para alarma SMS con intervalo máximo y mínimo. . . . .                                          | 83     |
| 58     | LCD en espera de ingresar datos máximo y mínimo para pH. . . . .                                                 | 84     |
| 59     | Nuevos intervalos establecidos para activación de alarma vía SMS. . . . .                                        | 84     |
| 60     | Diagrama de bloques con los principales módulos del sistema diseñado en este trabajo de tesis. . . . .           | 85     |
| 61     | Diagrama de bloques con las principales tareas que realiza el sistema diseñado en este trabajo de tesis. . . . . | 86     |
| 62     | Xbee shield. . . . .                                                                                             | 88     |
| 63     | XBee 1mW con <i>Trace Antenna</i> - Series 1 (802.15.4). . . . .                                                 | 89     |
| 64     | Módulo GSM shield. . . . .                                                                                       | 91     |
| 65     | Diagrama general utilizando el módulo Xbee. . . . .                                                              | 92     |

# Lista de figuras (Continuación)

| Figura |                                                                                                                          | Página |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 66     | Diagrama general utilizando el módulo GSM. . . . .                                                                       | 95     |
| 67     | Interfaz gráfica desarrollada para la empresa Grupo Marítimo. . . . .                                                    | 96     |
| 68     | Diagrama de bloques de interfaz gráfica desarrollada en Labview. . . . .                                                 | 96     |
| 69     | Configuración del puerto COM. . . . .                                                                                    | 97     |
| 70     | Lectura de datos por el puerto serie. . . . .                                                                            | 97     |
| 71     | Conversión de cadena de caracteres a formato numérico . . . . .                                                          | 97     |
| 72     | Etapas para guardar datos en archivo de texto. . . . .                                                                   | 98     |
| 73     | Diseño de carcasa hermética para sistema propuesta. . . . .                                                              | 100    |
| 74     | Medidas en mm de la carcasa hermética para sistema realizado. . . . .                                                    | 100    |
| 75     | Diseño de la carcasa hermética para el Xbee de la PC. . . . .                                                            | 101    |
| 76     | Medidas en mm de la carcasa hermética para el Xbee de la PC. . . . .                                                     | 102    |
| 77     | Prototipo en protoboard. . . . .                                                                                         | 102    |
| 78     | Pruebas de laboratorio. . . . .                                                                                          | 103    |
| 79     | Primer prototipo ensamblado en una carcasa genérica. . . . .                                                             | 103    |
| 80     | Pruebas experimentales del circuito con fuente de voltaje positiva y negativa. . . . .                                   | 104    |
| 81     | Sensores de oxígeno disuelto probados en cultivo de Totoaba. . . . .                                                     | 104    |
| 82     | Primer prototipo en funcionamiento con cultivo de Totoaba. . . . .                                                       | 105    |
| 83     | Segundo prototipo de medición de pH y temperatura, para cultivo de almeja Generosa. . . . .                              | 105    |
| 84     | Tercer prototipo utilizado de medición de pH y temperatura, para medición de tanque principal de bombeo de agua. . . . . | 106    |
| 85     | Cuarto prototipo de medición de pH y temperatura, para medición de cultivo de langosta roja. . . . .                     | 107    |
| 86     | Equipo de sensor de pH, temperatura y NH <sub>3</sub> en medición de cultivo de almeja generosa. . . . .                 | 107    |
| 87     | Medición de pH en la empresa Oceánica. . . . .                                                                           | 108    |
| 88     | Registro de temperatura y pH en la empresa Oceánica. . . . .                                                             | 109    |
| 89     | Registro de temperatura y pH en la empresa Grupo Miramar. . . . .                                                        | 110    |
| 90     | Sistema YSI 55 para oxígeno disuelto y temperatura. . . . .                                                              | 110    |
| 91     | Comparación del sistema de oxígeno disuelto obtenido versus uno comercial. . . . .                                       | 111    |
| 92     | Comparación del sistema de pH obtenido versus uno comercial. . . . .                                                     | 112    |
| 93     | Instrumento de medición de salinidad en empresa Grupo Miramar. . . . .                                                   | 113    |
| 94     | Medición de temperatura obtenida en estanque de Totoaba en etapa adulta en laboratorio de UBP. . . . .                   | 114    |
| 95     | Medición de temperatura obtenida en estanque de totoaba en etapa juvenil en laboratorio de UBP. . . . .                  | 114    |

# Lista de figuras (Continuación)

| Figura |                                                                                                                                               | Página |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 96     | Cambio de color y propiedades del agua, al haberse dado el proceso de alimento y desechos naturales de la semilla de almeja generosa. . . . . | 115    |
| 97     | Medición de oxígeno disuelto obtenido en estanque de totoaba en etapa adulta en laboratorio de UBP. . . . .                                   | 115    |
| 98     | Medición de oxígeno disuelto obtenido en estanque de totoaba etapa juvenil en laboratorio del UBP . . . . .                                   | 116    |
| 99     | Medición de pH obtenido en estanque # 1 en cultivo de almeja generosa.                                                                        | 117    |
| 100    | Medición de pH obtenido en estanque # 2 en cultivo de almeja generosa.                                                                        | 118    |
| 101    | Medición de temperatura obtenida en estanque # 1 en cultivo de almeja generosa. . . . .                                                       | 118    |
| 102    | Medición de emperatura obtenida en estanque # 2 en cultivo de almeja generosa. . . . .                                                        | 119    |
| 103    | Medición de alinidad obtenido en estanque de cultivo de almeja generosa.                                                                      | 120    |
| 104    | $NH_3$ obtenido en estanque de cultivo de almeja generosa. . . . .                                                                            | 121    |
| 105    | Sensor de pH con formación de sarro y KCL. . . . .                                                                                            | 122    |
| 106    | Sensor de pH dañado por golpe físico. . . . .                                                                                                 | 123    |

# Lista de tablas

| Tabla |                                                                                                                                      | Página |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| I     | Propiedades que afectan la calidad del agua salina . . . . .                                                                         | 10     |
| II    | Variación de pH respecto la temperatura. . . . .                                                                                     | 16     |
| III   | Cantidad de mg/L de oxígeno disuelto que puede tener el agua, respecto la temperatura y salinidad respecto al nivel de mar . . . . . | 22     |
| IV    | Lista de comandos para el circuito EZO. . . . .                                                                                      | 63     |
| V     | Propiedades de los modelos Xbee y Xbee Pro. . . . .                                                                                  | 90     |
| VI    | Comparación YSI 55 y sistema electrónico desarrollado. . . . .                                                                       | 109    |
| VII   | Comparación Jenco 5005 y sistema electrónico desarrollado. . . . .                                                                   | 111    |

# Capítulo I

## Introducción

El presente trabajo de tesis de maestría, se ha desarrollado con la finalidad de contribuir a la solución de problemas de medición continua en sistemas de acuacultura, mediante el **diseño de un sistema electrónico de monitorización**, dado que dichos sistemas actualmente son operados manualmente por técnicos que toman la medición cada determinada hora. Además cuentan con el peligro existente que en periodo de producción o cultivo alguna variable química esté fuera del intervalo permitido para la especie a cultivar, lo cual puede provocar la mortandad de dicha especie y por consiguiente pérdidas económicas millonarias.

Para garantizar dicha obtención de datos, se hará uso de sensores ISE (Electrodo de Ión Selectivo) para la medición de variables químicas y el uso de circuitos analógicos y digitales para su procesamiento de señal. Por otra parte, para la facilidad del usuario el sistema contiene una pantalla LCD (Pantalla de Cristal Líquido) y un teclado matricial, el cual tiene la capacidad de usar la memoria EEPROM (Memoria de solo lectura programable y borrable eléctricamente) del  $\mu C$  (Micro-controlador) para guardado de claves e intervalo de activación de las alarmas.

El sistema tiene la capacidad de transmitir información con comunicación inalámbrica utilizando la tecnología Zigbee hacia una computadora personal, donde será procesada por un programa con interfaz gráfica. Finalmente cuenta con la comunicación GPRS (Servicio general de paquetes vía radio) para el envío de mensajes SMS (Servicio de mensaje corto) al activarse una alarma de alguna variable química.

## I.1 Motivación

La necesidad de alimentación de la población requiere que los procesos de empaquetado alimenticio esten en tiempo y forma, sin afectar los procesos naturales de reproducción de las especies, como se ha visto en Naylor *et al.* (2000) y Tidwell y Allan (2001). Conforme el pasar de los años estos procesos han evolucionado gracias a la tecnología que se ha desarrollado para realizar sus actividades de mejor manera y en menor tiempo. En el campo de la acuicultura se han desarrollado diferentes técnicas y estrategias para ello, sin embargo, muchos aún carecen del uso de la electrónica debido a falta de información de las ventajas que conlleva el uso de sistemas autónomos de medición y control, lo cual permite obtener una producción más eficiente, en mayor cantidad y cumpliendo con las normas de calidad que exigen cada vez más cualidades de salud y necesidad de dependencia tecnológica, para reducir el tiempo invertido en recursos humanos y coadyuvar en el desarrollo de tecnología e investigación del proceso de crecimiento y reproducción acuícola en la región y en el país.

## I.2 Planteamiento del problema

### I.2.1 Descripción del problema

Este trabajo de tesis se centrará en la solución de problemas específicos de monitorización de variables químicas en la Empresa Oceánica, ubicada en la Zona Sauzal en la ciudad de Ensenada, Baja California.

En los laboratorios tienen la necesidad de diversos sistemas electrónicos capaces de medir variables físicoquímicas, dado que dichas variables son registradas en una bitácora en ciertos momentos del día y noche, lo que provoca más tiempo de análisis sobre el comportamiento de dichas variables, además de los errores humanos al realizar una medición incorrecta. Finalmente no cuentan con una alarma visual o sonora cuando

alguna variable química se sale de su rango normal de operación.

Otro problema existente es el limitado desarrollo de sistemas electrónicos existentes en el país, dado que los sistemas que se encuentran en la empresa son extranjeros y obsoletos, por lo cual es una limitante económica y tecnológica para la reproducción de las especies marinas.

Por lo mencionado anteriormente, es útil y necesario el desarrollo de un sistema electrónico de medición de las variables químicas y el análisis de la información obtenida.

### **I.2.2 Preguntas de investigación**

- ¿Qué ventajas tiene el uso de sensores de tipo Electrodo de Ión Selectivo (ISE), como lo son de mantenimiento, tiempo de uso, etc. respecto al uso de etiquetas colorimétricas?
- ¿Qué precisión existe entre la medición de oxígeno disuelto, comparado con un sistema extranjero comercial?
- ¿Cuál es la tolerancia de error que puede existir entre la medición de amoníaco y pH por parte del sistema, comparado con la medición colorimétrica de laboratorio?
- ¿Qué elementos visuales debe tener la interfaz gráfica para el uso fácil por el usuario?
- ¿Cuál es el tamaño necesario de la carcasa hermética, para la correcta distribución del circuito y evitar fallas eléctricas?

### **I.2.3 Delimitación del problema**

#### **Delimitación geográfica**

En los sistemas embebidos de monitoreo se estudian las variables físicoquímicas que afectan a un cultivo, como medirlas y controlarlas, a su vez dichos sistemas pueden



contener módulos de comunicación a distancia clasificadas según su alcance dentro de las cuales se encuentran: las redes de área personal, de área local y de área amplia; el proyecto tiene delimitación dentro de la universidad y la empresa con la aplicación del monitoreo y envío de dicha información a una computadora personal (PC) y alarma a celular.

### **Tecnología utilizada**

- Uso de sistemas embebido basados en microcontrolador ATMEGA 328 de ATMEL Corp. y ATMEGA 2560 de ATMEL y sus complementos para realizar el envío de datos inalámbricamente a una PC(Computadora Personal) mediante el protocolo IEEE 802.4.15
- Uso de sensores ISE para oxígeno disuelto y pH.
- Sensor de temperatura digital DS18B20
- Pantalla LCD de 20x4 caracteres.
- Utilización del canal inalámbrico de comunicación en RF (Radio Frecuencia) mediante módulos de comunicación con tecnología ZigBee para ser utilizados con el microcontrolador ( $\mu$ C) ATMEGA 328 y/o 2560.
- Serie de datos que contienen la información de cada sensor, la hora y la fecha en que fue tomada la muestra, la cual es guardada en un archivo de texto ASCII(Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información.) en la PC y desplegada mediante un programa de datos en tiempo real.
- Bloques de conversión Analógica-Digital (ADC). ADC incluido en  $\mu$ C ATMEGA 328 y/o 2560.

## Delimitación de usuarios

En este proyecto se propone la implementación de un sistema embebido que obtenga la medición de variables físicoquímicas en un estanque con una especie marina, transmita inalámbricamente dichos datos, mientras el otro dispositivo se encuentra en la PC recibiendo los datos y desplegando dicha información en tiempo real. El usuario final para las pruebas en campo es la empresa Productos Oceánica.

## I.3 Metodología

Para desarrollar de este trabajo de tesis utilizamos el método científico. La figura 1 muestra el esquema a bloques de la propuesta de solución:

- **Observación:** En esta etapa se lleva a cabo la búsqueda del estado del arte relacionado con el proceso físicoquímico de las variables presentes en el medio y la forma de medición que existe actualmente, además de la investigación y recopilación de información de sensores ISE. Corresponde al módulo A.
- **Diseño de circuitos electrónicos:** Esta etapa es necesario una vez realizada la observación del funcionamiento de los sensores ISE, con lo cual se desarrollan los circuitos electrónicos necesarios para la toma de muestras, filtros, etc; donde se hace la selección y diseño de circuitos de instrumentación para los sensores. La prueba de dichos sensores con sustancias químicas estandarizadas, la selección de  $\mu C$ , software a utilizar, la selección y delimitación de material y equipo. Esto se encuentra en el módulo B.
- **Programación y pruebas de equipo:** En esta etapa se desarrollan los programas necesarios para el  $\mu C$  para el correcto funcionamiento de los sensores ISE, además del envío inalámbrico de datos, empezando con el algoritmo de programación y simulación para la toma de muestras por parte de los sensores ISE, la

programación para la transmisión inalámbrica de datos, posteriormente las pruebas del módulo para el envío inalámbrico de datos, finalmente la configuración e implementación de dispositivo de alarma de servicio de mensaje corto (SMS) para una variable química. Corresponde al módulo C.

- **Comparación y calibración con patrones:** Este el módulo D. En esta etapa se realizan pruebas del equipo en campo y se realizarán los ajustes necesarios para la medición correcta respecto a las variables químicas medidas, mediante la comparación con patrones que a su vez se desarrolla la interfaz gráfica, este paso se puede regresar al módulo C.
- **Emsamblaje y pruebas finales:** En este etapa se desarrolla la carcasa para los circuitos electrónicos mediante la toma de longitud de prototipo para diseño y construcción y se deja por 3 meses en funcionamiento en campo, para obtener la validación del sistema. Corresponde al módulo E.
- **Escritura de tesis:** Este es el módulo final F, donde se redacta la tesis con la teoría realizada en los pasos A y B y los resultados obtenidos en los pasos posteriores, al terminar la etapa E se anexan las mediciones obtenidas en campo, para realizar dicha presentación y defensa de tesis.

## I.4 Objetivos del proyecto

### I.4.1 Objetivo general

Diseñar e implementar circuitos electrónicos y programación de un sistema capaz de medir las variables químicas presentes en procesos de producción acuícola, empleando agua dulce y salada: Oxígeno disuelto, salinidad, pH, amonio ( $\text{NH}_3\text{-NH}_4$ ) y temperatura, a su vez contará con un módulo de telemetría para registro de datos y envío de alarmas, con una interfaz gráfica para el usuario.

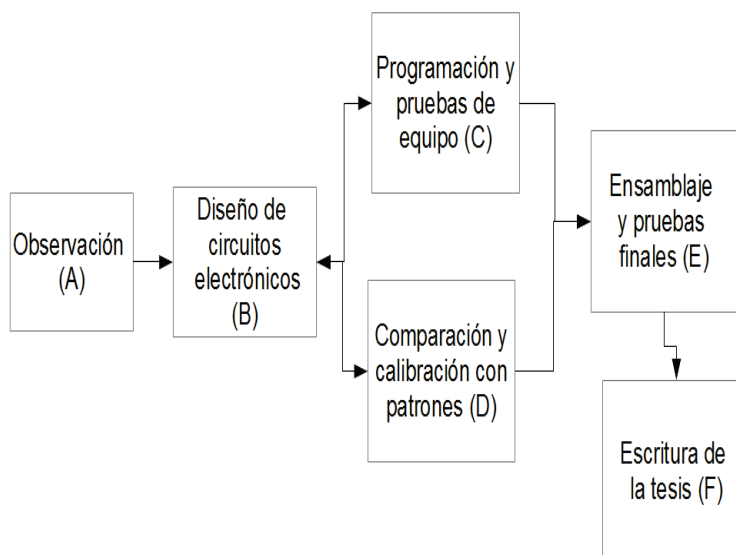


Figura 1: Esquema a bloques del proyecto propuesto.

#### I.4.2 Objetivos específicos

- Seleccionar los sensores ISE necesarios para su uso en agua dulce y agua de mar.
- Implementar un módulo de telemetría con comunicación Zigbee desde el cultivo a medir hasta la oficina para su procesamiento de datos.
- Realizar pruebas experimentales de la medición de las variables químicas del instrumento en diferentes tipos de cultivo en agua dulce y agua de mar.
- Comparar y ajustar la magnitud de error en la medición de amonio mediante el sensor ISE y el método colorimétrico tradicional de laboratorio.
- Capacidad de seleccionar los niveles (mínimo y máximo) para la activación de la alarma SMS.
- Programar una interfaz gráfica adaptada al usuario, el cual se podrá guardar la información en un archivo de texto en la PC y además monitorear las variables medidas en el momento.

- Diseñar y construir una carcasa hermética para el sistema.

## I.5 Organización de la tesis

Este trabajo de tesis de maestría se organiza en seis capítulos y tres apéndices. El **segundo capítulo** presenta el marco teórico sobre las variables a medir y los dispositivos electrónicos utilizados. El **tercer capítulo** presenta la etapa de instrumentación de los sensores y una breve explicación de la programación en el  $\mu C$  mediante diagramas de flujo. El **cuarto capítulo**, presenta la implementación de la etapa de comunicación inalámbrica mediante los módulos Xbee para el envío de información a una PC y el módulo GSM para envío de mensajes SMS a celular, además del diseño del programa GUI para la empresa donde se desarrolló la solución al problema. El **capítulo cinco** presenta los resultados experimentales obtenidos al realizar las pruebas en el laboratorio y en la empresa, realizando la comparación con los sistemas que actualmente utilizan en la medición de parámetros para corroborar la eficacia del sistema realizado, se presentan gráficas de resultados obtenidos en un periodo de tiempo. Finalmente, el **capítulo seis** presenta las conclusiones generales, aportaciones y potenciales trabajos a desarrollar en un futuro. El **apéndice A**, presenta algunos códigos implementados en el  $\mu C$  utilizando los circuitos digitales. El **apéndice B** presenta el glosario de términos utilizado para la tesis. El **apéndice C** presenta los productos de investigación y reconocimientos derivados de este trabajo de maestría.

# Capítulo II

## Marco Teórico

### II.1 Parámetros generales en acuacultura

La acuacultura es una de las mejores técnicas creada por el hombre para aumentar la cantidad, disponibilidad y calidad de alimento y se presenta como una alternativa para la administración de los recursos acuáticos. Esta técnica ha permitido, en los últimos años, convertir a numerosos ríos, lagos y áreas costeras en una fuente de recursos alimenticios, gracias al trabajo que el hombre ha desarrollado cultivando organismos en estas áreas, un ejemplo se puede ver en Martínez (2006).

En 1600 aparece el libro del inglés John Taverner, en el que señala los métodos para el manejo de estanques para el cultivo de la carpa común. En los principios del presente siglo se han desarrollado las bases técnicas y científicas de los sistemas modernos de acuacultura, algunos métodos están descritos en Timmons *et al.* (2002).

En el área de la piscicultura existen diversos parámetros que afectan al cultivo realizado, estas variables afectan en mayor o menor grado dependiendo de la especie monitoreada y la información obtenida a través de la investigación de los biólogos, oceanólogos y productores del área. Las variables medidas en acuacultura son citadas por Colt y Huguenin (2002), las cuales son presentadas en la tabla I, la cual muestra las variables físicas, químicas y biológicas que más impacto tienen en los procesos de producción acuícola.

| Físicas           | Químicas          | Biológicas |
|-------------------|-------------------|------------|
| Temperatura       | pH y acidez       | Bacterias  |
| Salinidad         | Oxígeno           | Virus      |
| Color             | Nitrógeno         | Hongos     |
| Intensidad de Luz | Nitratos          |            |
|                   | Metales disueltos |            |
|                   | Desinfectantes    |            |

Tabla I: Propiedades que afectan la calidad del agua salina

## II.2 Teoría de sensores electroquímicos

El método tradicional de laboratorio es el utilizado para la medición de variables químicas, el cual consiste en:

1. Un laboratorista obtiene una muestra del medio.
2. De dicha muestra, se realizan reacciones químicas para identificar el parámetro químico.

Este método tiene la característica del uso de un recurso humano al obtener la muestra y el tiempo requerido en prepararla, a diferencia del uso de un sensor electroquímico, el cual consiste en:

1. Es un dispositivo químico que responde a cambios específicos en el potencial o en la corriente eléctrica como consecuencia de la presencia de una especie química que interactúa con él.
2. Los componentes electrónicos del instrumento detectan y amplifican estas corrientes y clasifican el resultado según la calibración de la unidad, donde comúnmente se utiliza la unidad partes por millón (ppm).
3. El electrolito del sensor se selecciona de tal manera que interactúa con la muestra a analizar de manera muy exclusiva o selectiva.

En la literatura química se conoce a estos sensores químicos por sus siglas en inglés ISE. Un ejemplo de aplicación se menciona por Henkel *et al.* (2007), en dicho artículo se describe la implementación de una estructura para el cultivo de peces, en la cual existe el cultivo y la separación del agua utilizada y filtrada, debido a que se realiza un análisis en cada etapa del proceso, con la medición de las variables químicas como el pH, oxígeno, cloro, alga azul, etc.

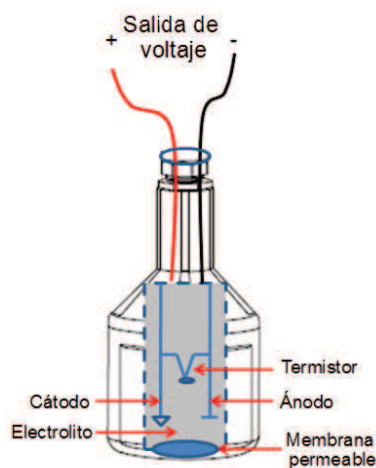


Figura 2: Esquemático de un sensor electro-químico de oxígeno disuelto. Recuperado de Técnicas electroanalíticas [Online] (22 de Enero de 2015)

### II.2.1 Potencial de hidrógeno (pH)

El término pH proviene de la combinación de la letra **p** de la palabra potencial y la letra **H** del símbolo del elemento hidrógeno. Juntas, estas letras significan el potencial o exponente del hidrógeno. El pH se define como el logaritmo decimal de la inversa de la actividad del hidrógeno, donde la actividad,  $a_{H^+}$ , describe el ión libre de hidrógeno o la concentración efectiva en presencia de otros iones, esto se puede ver con mayor información en Anderson Guarnizo Franco (2015).

$$pH = -\log_{10}[a_{H^+}] \quad (1)$$



De este modo, un pH de 3 equivale a una actividad del ion de hidrógeno de  $10^{-3}$  mol; un pH de 11 equivale a una actividad de  $10^{-11}$  mol y un pH de 11.5 sería una actividad de ion de hidrógeno de  $10^{-11.5}$  mol. El pH sirve como una forma práctica de comparar la acidez o la alcalinidad relativa de una solución a una temperatura dada. Un pH de 7 describe una solución neutra porque las actividades de los iones de hidrógeno e hidróxido son iguales. Cuando el pH está por debajo de 7, la solución se describe como ácida porque la actividad del ión de hidrógeno es mayor que la actividad del ión de hidróxido. Una solución es más ácida cuando aumenta la actividad del ión de hidrógeno, como consecuencia, el pH se reduce. En cambio, cuando aumenta la actividad del ión de hidróxido, la solución se torna más alcalina, también se le denomina básica, con lo que aumentará el pH, una manera de saber cuanta es la cantidad de pH es mostrada en la figura 4, y algunos ejemplos de cálculos en los cambios de pH se encuentran en Harris *et al.* (2006).

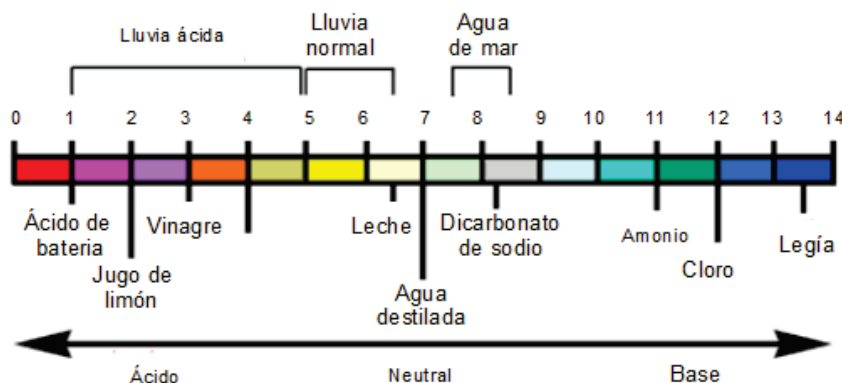


Figura 3: Valor de pH de materiales comunes.

En la figura 3 se muestran algunos valores de pH para materiales de uso habitual, donde este valor de pH es importante dependiendo del organismo o proceso industrial que requiera para su funcionamiento.

El pH es una de las medidas más comunes en los laboratorios porque muchos procesos químicos dependen del pH, como lo son en alimentos, calidad de aire, agua, suelo, etc.

Con frecuencia, la velocidad o el ritmo de las reacciones químicas pueden ser alterados significativamente por el pH de la solución. La solubilidad de muchos agentes químicos en solución y su disponibilidad biológica dependen del pH. Usualmente la química fisiológica de los organismos vivos tiene límites muy específicos de pH.

La medición de pH puede ser mediante reacciones químicas, que a su vez cambian el color de la muestra dependiendo la cantidad de pH, un ejemplo de un kit comercial como se ilustra en la figura 4. Este es un kit comercial colorimétrico, el cual mediante una muestra de la sustancia a medir, al ser colocada en la probeta y realizar una reacción química, cambia su color dependiendo el valor de pH de dicha muestra.



Figura 4: Reactivos comerciales para medición de pH  
Recuperado de Kit de medición de pH comercial [Online] (20 de Mayo de 2011)

## II.2.2 Electrodo de pH

Los electrodos utilizados en este trabajo de investigación son electrodos ISE para pH, como se describe en la figura 5, el cual consiste en las siguientes partes:

1. Un bulbo de vidrio.
2. Un electrodo el cual su salida de voltaje es proporcional a los cambios de pH, normalmente es de cloruro de plata.
3. Un buffer de pH=7.
4. Usando electrodos de cloruro de plata, una porción de éste se precipita en el bulbo.
5. Un electrodo de referencia el cual su voltaje se mantiene constante, normalmente es el mismo material que el número 2.
6. Solución buffer para el electrodo de referencia.
7. Unión con la solución estudiada, por lo general hecha de cerámica.
8. El cuerpo del electrodo, que es de plástico.

Opcionalmente puede contener un compensador de temperatura, el cual ajusta el valor de pH dependiendo de la temperatura del medio.

En el caso de pH con valor de 7, el valor en  $mV$  es igual 0, mientras que por cada cambio de 1 grado de pH existen  $59.2 mV$ , donde son positivos cuando el pH es menor a 7 unidades, y son negativos cuando el pH es mayor en 7 unidades, dicho cambio de  $mV$  respecto al pH puede verse con mayor detalle en Monk (2008).

En la figura 6 se muestra un circuito de acondicionamiento para la señal proveniente del electrodo de pH, el cual consiste en

- Un amplificador operacional (OP-AMP), el cual el cual debe tener una impedancia muy alta (superior a  $1T\Omega$ ) para evitar la pérdida de los milivolts obtenidos por el electrodo de pH.

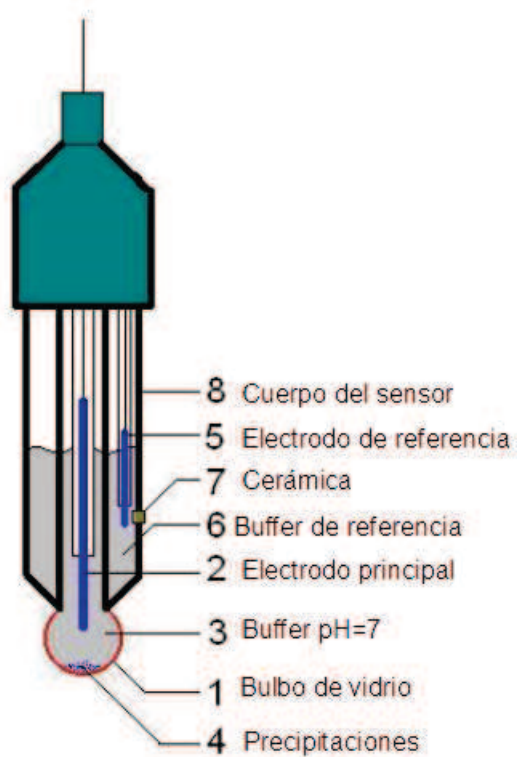


Figura 5: Sensor de pH.

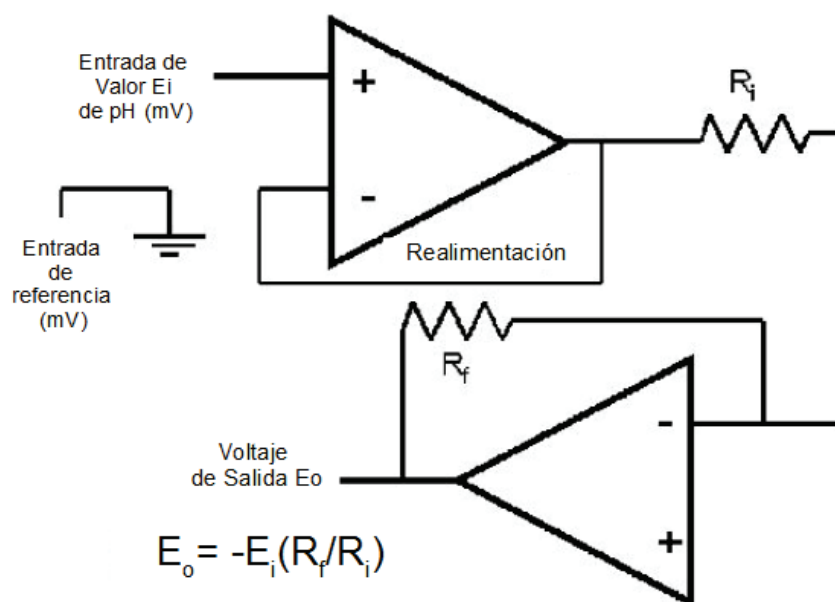


Figura 6: Esquemático de circuito para medición de pH.  
 Recuperado de Educación técnica de electrodo de pH [Online] (20 de Mayo de 2011).

- El siguiente OP-APM es una etapa de amplificación de dicha señal, la cual es procesada posteriormente por el microcontrolador.

### Variación de pH con la temperatura

Los sensores de pH tiene además un error de medición basado en la ecuación de Nertz de 0.03pH por cada 10 grados centígrados respecto a un valor de pH=7, por lo que es necesario tomar en cuenta dicha variación en sistemas donde existan cambios grandes en temperatura y se requiera una precisión en la medición de pH, tal como se muestra en la tabla II

|     | pH<br>2 | pH<br>3 | pH<br>4 | pH<br>5 | pH<br>6 | pH<br>7 | pH<br>8 | pH<br>9 | pH<br>10 | pH<br>11 | pH<br>12 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 5°  | .30     | .24     | .18     | .12     | .06     | 0       | .06     | .12     | .18      | .24      | .30      |
| 15° | .15     | .12     | .09     | .06     | .03     | 0       | .03     | .06     | .09      | .12      | .15      |
| 25° | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        | 0        | 0        |
| 35° | .15     | .12     | .09     | .06     | .03     | 0       | .03     | .06     | .09      | .12      | .15      |
| 45° | .30     | .24     | .18     | .12     | .06     | 0       | .06     | .12     | .18      | .24      | .30      |
| 55° | .45     | .36     | .27     | .18     | .09     | 0       | .09     | .18     | .27      | .36      | .45      |
| 65° | .60     | .48     | .36     | .24     | .12     | 0       | .12     | .24     | .36      | .48      | .60      |
| 75° | .75     | .60     | .45     | .30     | .15     | 0       | .15     | .30     | .45      | .60      | .75      |
| 85° | .90     | .72     | .54     | .36     | .18     | 0       | .18     | .36     | .54      | .72      | .90      |

Tabla II: Variación de pH respecto la temperatura.  
Recuperada de Educación técnica de electrodo de pH [Online] (20 de Mayo de 2011).

La tabla II contiene la variación de los niveles de pH respecto a la temperatura, donde el valor neutro es en un nivel de pH=7 y temperatura de 25 grados centígrados, esta variación se considera si se necesita realizar mediciones muy precisas en un proceso industrial o investigación científica.

### II.2.3 Procedimiento de calibración de pH

Los electrodos de pH requieren un mantenimiento periódico, dependiendo de las especificaciones del fabricante, dado que la pendiente de 59 mV por unidad de pH presenta

una variación en su medida real, algunos de los principales factores que afectan al electrodo son:

- Reacciones químicas del electrodo con el medio a medir.
- Movimientos bruscos del medio a medir.
- Degradación del electrodo de referencia.
- Tiempo de vida del electrodo.

Un método para realizar la calibración de los electrodos de pH, es mediante el método de 2 puntos, que consiste en lo siguiente

- Se coloca el electrodo en un buffer de pH=7 y se ajusta la sensibilidad del voltaje del electrodo para indicar un valor de mV= 0V.
- Se coloca el electrodo en un buffer de pH=4 ó pH=10 y se realiza el ajuste de la pendiente del electrodo para indicar el valor de mV correspondiente.

Este método depende de la capacidad del instrumento utilizado, citado en Monk (2008) donde se reportan algunos factores y la calibración correspondiente.

## **II.2.4 Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto (DO) es el término utilizado para la medición de la cantidad de oxígeno disuelto en una unidad de volumen de agua. En las aplicaciones de calidad del agua, como el tratamiento de aguas residuales, el nivel de DO debe mantenerse alto. Para acuacultura, si el nivel de DO baja demasiado, los peces se asfixian. En el caso del tratamiento de aguas residuales, las bacterias descomponen los sólidos, por lo que si el nivel de DO es demasiado bajo, las bacterias mueren y la descomposición cesa, si el nivel de DO es demasiado alto, la energía se desperdicia en la oxigenación del agua.

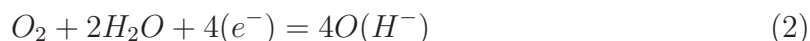
La importancia de la medición afecta tanto cultivos de agua dulce y agua de mar. (Shezifi *et al.*, 1997) realizan un estudio donde analizan las reacciones biológico - eléctricas de un cultivo de peces por hipoxia, que es la falta de oxígeno, así como los cambios necesarios en el DO al ser consumido por especies marinas, un ejemplo es citado en Thomas y Piedrahita (1997).

### **Sensor de oxígeno disuelto**

Hay dos técnicas fundamentales en los sensores ISE para la medición de DO: galvánico y polarográfico. Ambos sensores utilizan un sistema de electrodos, donde el DO reacciona con el cátodo para producir una corriente. Un sistema galvánico es aquel donde se seleccionan los materiales de los electrodos de manera que la diferencia de potencial (voltaje) es -0.5 voltios o mayores entre el cátodo y el ánodo, por lo que no necesitan un voltaje externo. Si se aplica un voltaje externo, el sistema se denomina polarográfico.

- Las sondas galvánicas son más estables y más precisas en los niveles bajos de oxígeno disuelto que las sondas polarográficas.
- Las sondas galvánicas a menudo operan varios meses sin electrolito o membrana de recambio, lo que resulta en un menor costo de mantenimiento.
- Las sondas polarográficas necesitan ser recargadas cada semana.

Por otra parte el cátodo es un electrodo de hidrógeno y lleva a un potencial negativo con respecto al ánodo. Dicho electrolito rodea el par de electrodos y está contenido por la membrana. Sin oxígeno, el cátodo se polariza con hidrógeno y resiste el flujo de corriente. Cuando el oxígeno pasa a través de la membrana, el cátodo se despolariza y los electrones se consumen. El cátodo reduce electroquímicamente el oxígeno a iones de hidróxilo:



En este trabajo de tesis se elije un sensor galvánico, que es el más utilizado en los procesos industriales. El oxígeno se difunde a través de la membrana, por lo que la cantidad de oxígeno está relacionada con el funcionamiento interno de la sonda para producir una corriente eléctrica, que es en miliamperes, posteriormente es convertida a milivolts. A su vez el DO tiene variaciones dependiendo la temperatura del agua, esto es compensado por el sensor al pasar la corriente a través de un termistor (una resistencia que cambia con la temperatura de salida) tal como se muestra en la figura 2, por lo que una ecuación que lo representa es:

$$V = I * R \quad (3)$$

Donde

V= Salida en Volts.

I= Corriente en A.

R= Resistencia del termistor.

Algunas características de las membranas de dichos sensores son:

- Los valores de pH de la sustancia a medir no afectan en el rendimiento de la membrana.
- El cloro y el sulfato de hidrógeno ( $H_2S$ ) provoca mediciones erróneas en los sensores.
- La presión atmosférica (por arriba del nivel del mar) afecta la medición del oxígeno, por lo que el sistema electrónico con el sensor debe ser calibrado respecto dicha presión al medir mg/L.



- Debe considerarse el nivel de salinidad para el ajuste de la cantidad de DO en el agua.

Además debe tomarse en cuenta que la presión que ejerce el oxígeno disuelto en el agua es una función de la temperatura del medio, por lo que debe calibrarse respecto a dicha temperatura, este efecto del oxígeno es aparte del ajuste que realiza el termistor, un ejemplo de este ajuste se puede ver en la tabla III, donde se encuentra el nivel de DO respecto una temperatura y presión a nivel del mar.

En todos los sensores de DO, es muy importante que exista un flujo de agua medido en cm/sec para tener una medición precisa, dado que si no existe este flujo de agua, el oxígeno que se encuentra alrededor de la membrana se consume y la medición local se vuelve incorrecta, este valor depende de la membrana utilizada y es especificado por el fabricante.

Todos los sensores de DO solamente detectan la cantidad en porcentaje que existe de oxígeno en el sensor, por lo que se requiere su conversión a mg/L, donde dependiendo de la cantidad de voltaje medido por el sensor se hace la conversión a porcentaje, posteriormente este porcentaje se convierte en mg/L dependiendo de la temperatura, presión y salinidad, entre otros factores. Se han realizado diversas investigaciones, buscando una ecuación empírica que permita establecer dicha relación, una ecuación más utilizada es la que relaciona la temperatura, la salinidad y el oxígeno, que es dada por (Weiss, 1970), la cual nos da el valor de oxígeno disuelto en ml/L:

$$Ln(DO) = A1 + A2 \cdot 100/T + A3 \cdot \ln(T/100) + A4 \cdot T/100 + S \cdot 1 + B2 \cdot T/100 + B3 \cdot (T/100)^2] \quad (4)$$

Donde:

Ln es el logaritmo natural.

T es la temperatura en grados Kelvin.

S es el valor de salinidad en partes por mil (ppt).

$$A1 = -173.4292.$$

$$A2 = 249.6339.$$

$$A3 = 143.3483.$$

$$A4 = -21.8492.$$

$$B1 = -0.033096.$$

$$B2 = 0.014259.$$

$$B3 = -0.0017.$$

El sensor medirá cierto porcentaje de oxígeno disuelto, dicho porcentaje se multiplica por el resultado obtenido para obtener el valor real en ml/L. Para convertir ese valor de ml/l a mg/L, se multiplica el valor obtenido por

$$(P/T) \cdot 0.5513 \quad (5)$$

Donde:

P es la presión atmosférica en mmHg.

T es la temperatura en grados Kelvin.

La tabla III muestra la cantidad máxima que puede haber de DO en el agua, donde el sensor de oxígeno obtiene una medición del porcentaje de oxígeno, con lo que se compara este porcentaje y se realiza una regla de tres (regla de proporción) para obtener el valor de mg/L utilizando la tabla anterior para agua a nivel del mar.

## II.2.5 Salinidad

Los sensores de salinidad estan basados en la medición de la conductividad, la cual es la habilidad de una solución química para permitir la conducción de la energía eléctrica. Un instrumento básico para realizar dicha medición es colocando 2 placas de un material

| Solubilidad del oxígeno disuelto (mg/L), respecto a la temperatura y la salinidad, con una presión a nivel del mar |       |                                   |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temperatura (Grados)                                                                                               |       | Salinidad en partes por mil (ppt) |       |       |       |       |       |       |       |       |
| C                                                                                                                  | F     | 0                                 | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    | 30    | 35    | 40    |
| 0                                                                                                                  | 32    | 14.6                              | 14.11 | 13.64 | 13.18 | 12.74 | 12.31 | 11.9  | 11.5  | 11.11 |
| 1                                                                                                                  | 33.8  | 14.2                              | 13.73 | 13.27 | 12.83 | 12.4  | 11.98 | 11.58 | 11.2  | 10.83 |
| 2                                                                                                                  | 35.6  | 13.81                             | 13.36 | 12.91 | 12.49 | 12.07 | 11.67 | 11.29 | 10.91 | 10.55 |
| 3                                                                                                                  | 37.4  | 13.45                             | 13    | 12.58 | 12.16 | 11.76 | 11.38 | 11    | 10.64 | 10.29 |
| 4                                                                                                                  | 39.2  | 13.09                             | 12.67 | 12.25 | 11.85 | 11.47 | 11.09 | 10.73 | 10.38 | 10.04 |
| 5                                                                                                                  | 41    | 12.76                             | 12.34 | 11.94 | 11.56 | 11.18 | 10.82 | 10.47 | 10.13 | 9.8   |
| 6                                                                                                                  | 42.8  | 12.44                             | 12.04 | 11.65 | 11.27 | 10.91 | 10.56 | 10.22 | 9.89  | 9.57  |
| 7                                                                                                                  | 44.6  | 12.13                             | 11.74 | 11.37 | 11    | 10.65 | 10.31 | 9.98  | 9.66  | 9.35  |
| 8                                                                                                                  | 46.4  | 11.83                             | 11.46 | 11.09 | 10.74 | 10.4  | 10.07 | 9.75  | 9.44  | 9.14  |
| 9                                                                                                                  | 48.2  | 11.55                             | 11.19 | 10.83 | 10.49 | 10.16 | 9.84  | 9.53  | 9.23  | 8.94  |
| 10                                                                                                                 | 50    | 11.28                             | 10.92 | 10.58 | 10.25 | 9.93  | 9.62  | 9.32  | 9.03  | 8.75  |
| 11                                                                                                                 | 51.8  | 11.02                             | 10.67 | 10.34 | 10.02 | 9.71  | 9.41  | 9.12  | 8.83  | 8.56  |
| 12                                                                                                                 | 53.6  | 10.77                             | 10.43 | 10.11 | 9.8   | 9.5   | 9.21  | 8.92  | 8.65  | 8.3   |
| 13                                                                                                                 | 55.4  | 10.53                             | 10.2  | 9.89  | 9.59  | 9.3   | 9.01  | 8.74  | 8.47  | 8.21  |
| 14                                                                                                                 | 57.2  | 10.29                             | 9.98  | 9.68  | 9.38  | 9.1   | 8.82  | 8.55  | 8.3   | 8.04  |
| 15                                                                                                                 | 59    | 10.07                             | 9.77  | 9.47  | 9.19  | 8.91  | 8.64  | 8.38  | 8.13  | 7.88  |
| 16                                                                                                                 | 60.8  | 9.86                              | 9.56  | 9.28  | 9     | 8.73  | 8.47  | 8.21  | 7.97  | 7.73  |
| 17                                                                                                                 | 62.6  | 9.65                              | 9.36  | 9.09  | 8.82  | 8.55  | 8.3   | 8.05  | 7.81  | 7.58  |
| 18                                                                                                                 | 64.4  | 9.45                              | 9.17  | 8.9   | 8.64  | 8.39  | 8.14  | 7.9   | 7.66  | 7.44  |
| 19                                                                                                                 | 66.2  | 9.26                              | 8.99  | 8.73  | 8.47  | 8.22  | 7.98  | 7.75  | 7.52  | 7.3   |
| 20                                                                                                                 | 68    | 9.08                              | 8.81  | 8.56  | 8.31  | 8.07  | 7.83  | 7.6   | 7.38  | 7.17  |
| 21                                                                                                                 | 69.8  | 8.9                               | 8.64  | 8.39  | 8.15  | 7.91  | 7.69  | 7.46  | 7.25  | 7.04  |
| 22                                                                                                                 | 71.6  | 8.73                              | 8.48  | 8.23  | 8     | 7.77  | 7.54  | 7.33  | 7.12  | 6.91  |
| 23                                                                                                                 | 73.4  | 8.56                              | 8.32  | 8.08  | 7.85  | 7.63  | 7.41  | 7.2   | 6.99  | 6.79  |
| 24                                                                                                                 | 75.2  | 8.4                               | 8.16  | 7.93  | 7.71  | 7.49  | 7.28  | 7.07  | 6.87  | 6.68  |
| 25                                                                                                                 | 77    | 8.24                              | 8.01  | 7.79  | 7.57  | 7.36  | 7.15  | 6.95  | 6.75  | 6.56  |
| 26                                                                                                                 | 78.8  | 8.09                              | 7.87  | 7.65  | 7.44  | 7.23  | 7.03  | 6.83  | 6.64  | 6.46  |
| 27                                                                                                                 | 80.6  | 7.95                              | 7.73  | 7.51  | 7.31  | 7.1   | 6.91  | 6.72  | 6.53  | 6.35  |
| 28                                                                                                                 | 82.4  | 7.81                              | 7.59  | 7.38  | 7.18  | 6.98  | 6.79  | 6.61  | 6.42  | 6.25  |
| 29                                                                                                                 | 84.2  | 7.67                              | 7.46  | 7.26  | 7.06  | 6.87  | 6.68  | 6.5   | 6.32  | 6.15  |
| 30                                                                                                                 | 86    | 7.54                              | 7.33  | 7.14  | 6.94  | 6.75  | 6.57  | 6.39  | 6.22  | 6.05  |
| 31                                                                                                                 | 87.8  | 7.41                              | 7.21  | 7.02  | 6.83  | 6.65  | 6.47  | 6.29  | 6.12  | 5.96  |
| 32                                                                                                                 | 89.6  | 7.29                              | 7.09  | 6.9   | 6.72  | 6.54  | 6.36  | 6.19  | 6.03  | 5.87  |
| 33                                                                                                                 | 91.4  | 7.17                              | 6.98  | 6.79  | 6.61  | 6.44  | 6.26  | 6.1   | 5.94  | 5.78  |
| 34                                                                                                                 | 93.2  | 7.05                              | 6.86  | 6.68  | 6.51  | 6.33  | 6.17  | 6.01  | 5.85  | 5.69  |
| 35                                                                                                                 | 95    | 6.93                              | 6.75  | 6.58  | 6.4   | 6.24  | 6.07  | 5.92  | 5.76  | 5.61  |
| 36                                                                                                                 | 96.8  | 6.82                              | 6.65  | 6.47  | 6.31  | 6.14  | 5.98  | 5.83  | 5.68  | 5.53  |
| 37                                                                                                                 | 98.6  | 6.72                              | 6.54  | 6.37  | 6.21  | 6.05  | 5.89  | 5.74  | 5.59  | 5.45  |
| 38                                                                                                                 | 100.4 | 6.61                              | 6.44  | 6.28  | 6.12  | 5.96  | 5.81  | 5.66  | 5.51  | 5.37  |
| 39                                                                                                                 | 102.2 | 6.51                              | 6.34  | 6.18  | 6.03  | 5.87  | 5.72  | 5.58  | 5.44  | 5.3   |
| 40                                                                                                                 | 104   | 6.41                              | 6.25  | 6.09  | 5.94  | 5.79  | 5.64  | 5.5   | 5.36  | 5.22  |

Tabla III: Cantidad de mg/L de oxígeno disuelto que puede tener el agua, respecto a la temperatura y salinidad respecto al nivel de mar

conductivo, con área conocida y la distancia a la que están colocados en la muestra. Entonces se aplica un voltaje a dichas placas y se mide la corriente de la muestra que fluye entre las dos placas.

La figura 7 ilustra el proceso de medición de la conductividad.

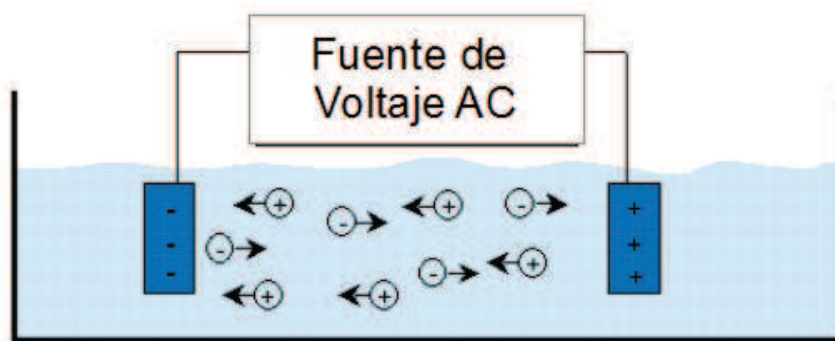


Figura 7: Medición de conductividad.  
Recuperado de Educación técnica de sensor de conductividad [Online] (20 de Mayo de 2011)

Utilizando la ley de Ohm

$$V = i \cdot R \quad (6)$$

Y conociendo la conductividad

$$G = 1/R \quad (7)$$

Entonces  $G$  puede ser determinada por

$$G = i/V \quad (8)$$

El número de iones que son conductivos (sales, metales, etc.) son los que generan el camino para los 2 electrodos del sensor de conductividad. A mayor concentraciones de iones, mayor conductividad. Típicamente se utiliza una señal de AC para prevenir la ionización de los electrodos.

## Medición de salinidad

La unidad utilizada para la medición de la conductividad eléctrica son los microSiemens [ $\mu S$ ]. Los valores altos de conductividad son expresados en el orden de miliSiemens.

Para la medición de salinidad, las industrias del tratamiento del agua han adoptado la nomenclatura de partes por millón (ppm). Para correlacionar ppm con  $\mu S$  es un proceso difícil, dado que el agua tiene diferentes concentraciones de sales y metales disueltos, que afectan el factor de conversión, por lo que es preferible utilizar los  $\mu S$  como unidad de medida, sin embargo, si se necesitan PPM, se utiliza la siguiente ecuación:

$$1 \text{ ppm} = 1.5\mu S \quad (9)$$

$$1 \text{ ppm}(\text{cloruro de sodio}) = 2\mu S \quad (10)$$

$$1 \text{ ppm}(\text{sales mixtas}) = 1.5\mu S \quad (11)$$

Un factor más exacto de conversión es  $\text{ppm} = 0.64 \cdot \text{conductividad}$

Los sensores de salinidad están definidos con una constante de celda  $K$ , la cual es proporcional a la distancia que separa a las 2 placas conductivas, y es inversamente proporcional al área de la superficie

$$K = L/A \quad (12)$$

Donde:

$L$ = Separación de las placas [cm]

$A$ = Área de las placas [ $cm^2$ ]

## Conversión de conductividad a salinidad

La conversión de conductividad a salinidad se da a través de la escala práctica de salinidad 1978 (PSS-78), la cual ha sido utilizada por Lewis y Perkin (1981) y Cooper

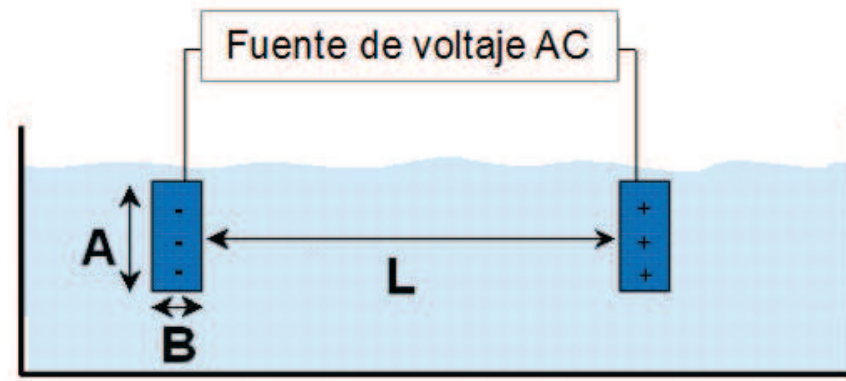


Figura 8: Valor de constante  $K$ .

Recuperado de Educación técnica de sensor de conductividad [Online] (20 de Mayo de 2011)

(1988), entre otros.

$$S = S_{pss} - \frac{0.0080}{1 + 1.5 + X + X^2} - \frac{0.0005 \cdot f(T)}{1 + Y^{0.5} + Y^{1.5}} \quad (13)$$

Donde:

S= Salinidad en ppt.

$S_{pss}$ = Salinidad, utilizando PSS-78.

$$S_{pss} = 0.008 - 0.1692R^{0.5} + 25.3851R + 14.0941R^{1.5} - 7.0261R^2 + 2.7081R^{2.5} + \delta S \quad (14)$$

$$\delta S = \left[ \frac{T - 15}{1 + 0.0162(T - 15)} \right] \cdot (0.005 - 0.0056R^{0.5} - 0.0066R - 0.0375R^{1.5} + 0.0636R^2 - 0.0144R^{2.5}) \quad (15)$$

$$f(T) = \frac{T - 15}{1 + 0.0162(T - 15)} \quad (16)$$

$$X = 400R$$

$$Y = 100R$$

T=Temperatura en grados centígrados

$$R = \frac{EC_s}{EC_r}$$

$EC_s$ =Conductividad eléctrica de la muestra ( $\mu S/cm$ )

$EC_r$ =Conductividad eléctrica del agua de mar ( $50.670 \mu S/cm$ )

## Efectos de la temperatura y compensación

La temperatura a la que se encuentre el sensor afecta el movimiento de los iones, a mayor temperatura, mayor movimiento de iones, por cada grado centígrado respecto a 25 grados centígrados, existe un 2 por ciento de error y un 5 por ciento en aguas con temperaturas menores a 25 grados centígrados.

## Aplicaciones

La medición de la conductividad es utilizado en procesos químicos, controles de comida, sistemas en estado gaseoso, recuperación de metales en metalurgia y minería, en la industria textil, además del tratamiento de aguas con los procesos de iones, osmosis, metales pesados, etc.

### II.2.6 Amoníaco

El amoníaco es un nutriente que contiene nitrógeno e hidrógeno. Su fórmula química es  $NH_3$ , que es su estado des-ionizado y el  $NH_4$  es su forma ionizada. El total de amoníaco es la suma de ambos, el cual se mide analíticamente en el agua:

$$[NH_3] + [NH_4^+] + [NH_4SO_4^-] \quad (17)$$

Su importancia radica por el nitrógeno, el cual es un nutriente para el crecimiento de las plantas. El amoníaco se convierte en el nitrito  $NO_2$  y nitratos  $NO_3$  por las bacterias, y es utilizado por las plantas, si embargo, es tóxico para los peces, anfibios e invertebrados.

El amoníaco principalmente es producido por:

- Excretos por metabolismo de peces.
- Por la descomposición de plantas y animales.

- Alimento sin comer.

Generando un sistema de conversión amoníaco-nitrógeno.

### **Medición de amoníaco**

La concentración de amoníaco en el agua es medida comercialmente por 2 métodos, los cuales son por método colorimetría (test kit), el cual es tomando una muestra de agua y realizando una reacción química, con lo cual dicha muestra obtiene un color característico dependiendo la cantidad de amoníaco presente en la muestra.

1. Nesslerización con o sin destilación previa (Colorimetría), el cual puede medir el total de amoníaco  $NH_3 + NH_4$ .
2. Electrodo selectivo de amoníaco con o sin destilación previa.
3. Volumetría con destilación previa (recomendable para concentraciones altas de amoníaco (a partir de 5 ppm), por encima de los límites para la determinación colorimétrica.

La desventaja de estos métodos es que son discretos y es muy vulnerable a errores humanos, debido a la subjetividad del color. En este trabajo de investigación se determinó el factor de  $NH_3$  mediante una ecuación en forma indirecta. Estos métodos ya han sido utilizado, en Crosby (1968), Kaiser y Wheaton (1988) y Spotte y Adams (1983), además da Silva *et al.* (2013), se puede ver el impacto de los efectos negativos del amoníaco en la tilapia.

### **Toxicidad**

El amoníaco libre es altamente tóxico para la vida acuática. Estos efectos han sido estudiados en algunas especies por Fromm y Gillette (1968) y Lloyd y Herbert (1960).



Mata en acuarios en cantidades muy bajas, por lo que cualquier nivel por encima de 0.02 mg/l (ppm) se considera perjudicial.

Puede ser tóxico para los peces marinos, especialmente si el pH difiere significativamente de agua de mar natural (por ejemplo, durante el transporte). El amoníaco libre es más tóxico a valores de pH más altos, además incrementa si la temperatura del agua aumenta.

El amoníaco libre ( $\text{NH}_3$ ) causa daño branquial, daños en órganos internos, daños en la piel y finalmente la muerte. Los síntomas típicos incluyen:

- Ojos nublados
- Respiración rápida
- Falta de apetito
- Disminución de defensas.

Los niveles tóxicos de amoníaco libre permitidos, en general son:

- 0.020-0.049 (ppm) se considera "tolerado", pero causará daño a largo plazo para el crecimiento, el sistema inmunológico, la salud, etc., especialmente a los huevos o los animales jóvenes.
- 0.050-0.199 (ppm) es tolerado por unos pocos días y es muy perjudicial.
- 0.200-0.499 (ppm) es tolerado por un día o dos y probablemente mueran algunas especies.
- 0.500+ (ppm) es mortal y probablemente muera todo el cultivo en un día.

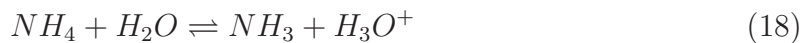
Las especies individuales de peces, anfibios, invertebrados, etc. varían enormemente en sus tolerancias de los bajos niveles de amoníaco y el problema se hace más complicado

para la etapa larvaria y juvenil dado son mucho más susceptibles al amoníaco que los animales en etapa adulta.

### Medición de amoníaco libre

Estos métodos también pueden ser utilizados indirectamente por la medición de otros parámetros que afectan la proporción del amoníaco, mencionado por Khoo *et al.* (1977) donde establecen una ecuación empírica sobre la cantidad de amoníaco presente en agua de mar apartir de ciertos parámetros con el  $NH_4$  y realizando su respectivo ajuste por métodos numéricos.

Hampson (1977) menciona a su vez la relación del amoníaco total ( $NH_3+NH_4$ ) y tóxico ( $NH_3$ ) en agua de mar y agua dulce, donde utiliza algunos parámetros establecidos en el artículo descrito anteriormente. Spotte y Adams (1983) establecen los límites superiores del total de amoníaco en agua de mar, dado que las reacciones químicas presentan un equilibrio entre la parte  $NH_4$  y  $NH_3$ , por lo que al incrementar una, decrece la otra y viceversa, como se muestra en la ecuación 18:



Es posible determinar el potencial de reducción de un electrodo mediante el cambio de pH, la temperatura y otros factores, esto es utilizado por la ecuación de Nernst para determinar la concentración de  $NH_3$  y el voltaje producido, que puede verse su utilización, por ejemplo en Imanaka *et al.* (1998) y Arevalo y Pastor (1985). Emerson *et al.* (1975) obtienen el cálculo y una ecuación empírica de un parámetro necesario para calcular la fracción de amoníaco tóxico presente en agua dulce:

$$f_{NH_3} = \frac{1}{1 + 10^{(pK-pH)}} \quad (19)$$

Donde:

$f_{NH_3}$  = amoníaco libre, en porcentaje

$pH$  = Valor de pH

$$pK = 0.0901821 + 2729.2/(T + 273.2) + (0.1552 - 0.0003142(T)) \cdot I$$

T = Temperatura de la solución en grados Kelvin.

I = Fuerza molar de iones en el agua (35 en agua de mar, 0 en agua dulce)

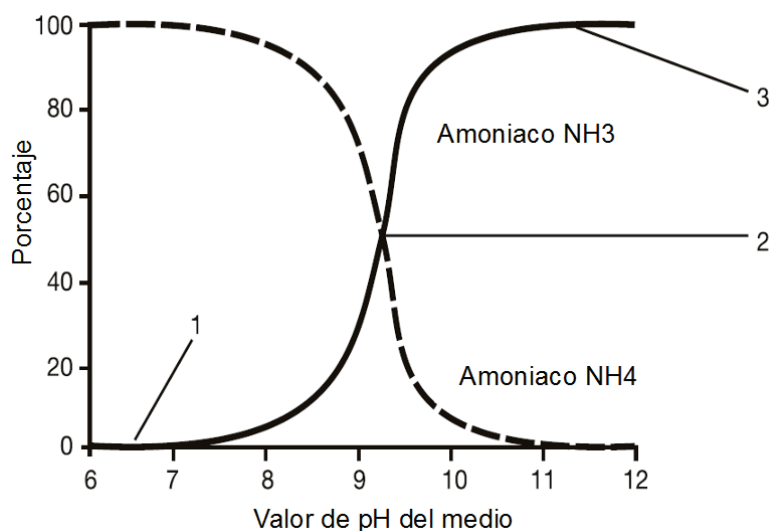


Figura 9: Distribución de amoníaco NH<sub>3</sub>-NH<sub>4</sub> en el medio.

Recuperado de Hoja de datos sensor ISE amoníaco [Online] (20 de Mayo de 2011)

La figura 9 describe el porcentaje de la distribución de amoníaco NH<sub>3</sub>-NH<sub>4</sub> en el medio, donde se indica lo siguiente:

1. Sólo se encuentran iones NH<sub>4</sub>.
2. La proporción de iones NH<sub>3</sub>-NH<sub>4</sub> es 1:1.
3. La mayoría de los iones son NH<sub>3</sub>.

Es por eso que a mayor nivel de pH, existe mayor nivel de amoníaco tóxico

## II.2.7 Temperatura

La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de calor, frío, templado o tibio, medible mediante un termómetro. En física, se define como una magnitud

escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica. Está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como *energía cinética*, que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido traslacional, rotacional, o en forma de vibraciones. A medida de que sea mayor la energía cinética de un sistema, se observa que éste se encuentra más caliente; es decir, que su temperatura es mayor, una mayor información sobre el comportamiento de la temperatura se puede encontrar en Ercilla y Muñoz (2003) y Roller y Blum (1986).

La temperatura del agua de mar es una variable medioambiental con influencia directa sobre el rendimiento empresarial, razón por la que se puede considerar como un aspecto estratégico para las empresas: elegir la localización más adecuada para el cultivo puede ser el factor determinante para la viabilidad empresarial en acuicultura, un ejemplo sobre la rentabilidad de las empresas marinas es citado en García y Sotorrió (2012).

La temperatura como variable medioambiental genera otras consecuencias. Por ejemplo, en un contexto en el que el agua fría del invierno hace más lento el crecimiento y hace madurar las gónadas de los peces, con la consiguiente pérdida de peso útil comestible, por lo que mantener una oferta estable de dorada y lubina de acuicultura todo el año se vuelve muy complejo para las empresas. Esta es la razón por la que existe una marcada estacionalidad de la oferta, que suele concentrarse en el verano (donde el crecimiento es máximo y la demanda mayor) y el otoño, momento en que las empresas prefieren pescar su stock de talla comercial para minimizar las pérdidas que conllevaría el mantener los peces otro invierno en el mar. Es evidente el efecto que esta concentración de la oferta tendrá sobre los precios. Por otro lado, que los peces precisen de un periodo tan prolongado de cría en el mar, incrementa los riesgos de la actividad, y dificulta la capacidad de planificación de la producción para adecuarla a la

demanda. La falta de seguridad respecto a las condiciones de mercado que se encontrará el productor en el momento de la comercialización, dificulta a las empresas la obtención de financiamiento crediticio, lo que en muchos casos, les obliga a tomar decisiones drásticas para obtener liquidez y minimizar pérdidas, como vender el stock a precios cercanos al costo, con la consiguiente desestabilización del mercado.

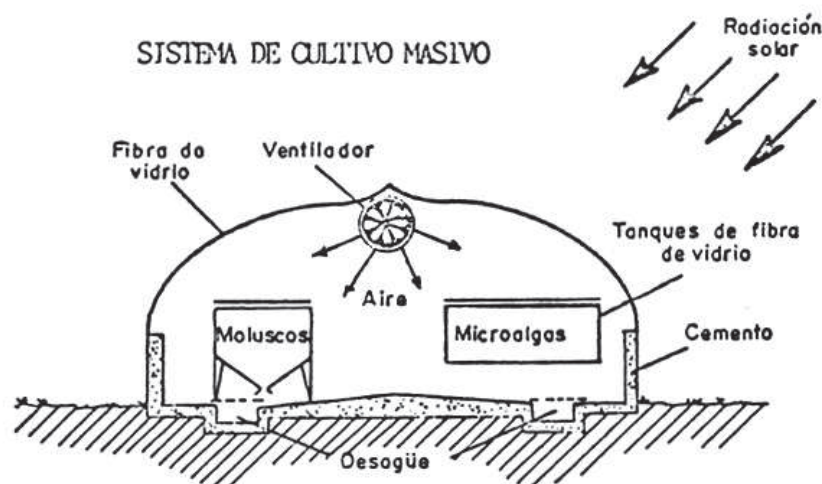


Figura 10: Ejemplo de control de temperatura en un invernadero.  
Recuperado de Cultivo de microalgas [Online] (20 de Mayo de 2011).

La figura 10 muestra en un dibujo esquemático una propuesta de control de temperatura para un cultivo de acuicultura, mediante un ventilador y los materiales necesarios, como la fibra de vidrio, para regular la temperatura durante el día.

## II.3 Sistemas embebidos

Wolf (2012) menciona en su libro que un sistema empotrado es un sistema de computación diseñado para realizar una o algunas funciones en un dispositivo en tiempo real. Los sistemas empotrados se utilizan para usos muy diferentes a los usos generales a los que se suelen someter las computadoras personales. A diferencia de los sistemas computacionales, estos sistemas solucionan un problema específico y están dispersos en

todos los ambientes posibles de la vida cotidiana. Existen sistemas electrónicos para el análisis químico, sin embargo los avances del procesamiento químico moderno han sido en beneficio exclusivo de las empresas con más ingresos económicos debido al alto costo que representan los complejos análisis de laboratorio; como la cromatografía de un gas. Estos métodos son efectivos y exactos para detectar concentraciones químicas, sin embargo su uso ha sido simplemente inimaginable para aplicaciones residenciales, como sensor sustancias tóxicas en alimentos. A estos procesos de laboratorio existe la desventaja del tiempo de procesamiento de datos, dado que un estudio en un laboratorio convencional puede tardar varios días en arrojar resultados. Esto último en situaciones de emergencia es inaceptable, por lo que es necesaria alguna forma de medición in situ que permite medir el mismo valor en un tiempo más corto y evitar problemas graves.

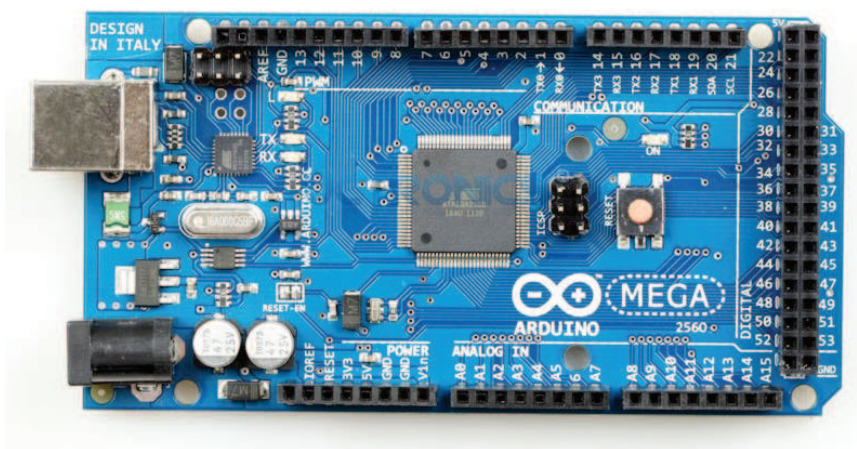


Figura 11: ATMEGA2560 utilizado como sistema embebido  
Recuperado de Tarjetas Arduino [Online] (20 de Mayo de 2011)

La figura 11, muestra el sistema embebido que se propone utilizar en este trabajo de tesis, el cual cuenta con las características necesarias para el correcto funcionamiento de todo el sistema.

## Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado que contiene una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria (RAM y ROM), puertos de entrada y salida y periféricos. Estas partes están dentro del microcontrolador y en conjunto forman lo que se le conoce como microcomputadora.

El propósito fundamental de los microcontroladores es leer y ejecutar los programas que el usuario le escribe, es por esto que la programación es una actividad básica e indispensable cuando se diseñan circuitos y sistemas que los incluyan. El carácter programable de los microcontroladores simplifica el diseño de circuitos electrónicos. Permiten modularidad y flexibilidad, ya que un mismo circuito se puede utilizar para que realice diferentes funciones con solo cambiar el programa del microcontrolador.

Existen varios fabricantes de microcontroladores tales como Texas Instruments, Motorola, Atmel, Intel, Microchip, Toshiba, National Instruments, etc. Todos ellos ofrecen microcontroladores con características similares, con la capacidad de leer y ejecutar los programas del usuario.

Evidentemente algunos modelos tienen más capacidad que otros, en cuanto a memoria, velocidad, periféricos, etc.

En el diseño de un sistema con microcontrolador se pueden elegir dispositivos de los fabricantes y satisfacer la necesidad del sistema en cuestión, por lo que se debe tomar en cuenta lo siguiente:

1. Disponibilidad de los microcontroladores en el mercado local y/o global.
2. Disponibilidad de información y herramientas de desarrollo.
3. Precio.

4. El modelo de microcontrolador específico que se debe elegir depende de la aplicación.

En el desarrollo de esta tesis se propone utilizar el **ATMEGA 2560** de la compañía **ATMEL**, la figura 11, el cual esta embebido en una tarjeta de desarrollo **ARDUINO MEGA**.

### **II.3.1 ATMEGA 2560 y tarjeta de desarrollo ARDUINO MEGA**

El  $\mu C$  ATMEGA2560 es un dispositivo CMOS de 8 bits, con arquitectura RISC. Contiene las siguientes características:

- 256 Kbyte de memoria programable FLASH.
- 4 Kbytes de memoria EEPROM.
- 8 Kbytes de memoria SRAM.
- 86 pines I/O de uso general.
- Contador de tiempo real (RTC).
- 6 temporizadores con modos de comparación y PWM.
- 4 puertos USART.
- 1 puerto de comunicación I2C.
- 1 módulo ADC de 10 bits con 16 canales.
- 1 puerto de comunicación SPI.
- Contiene un puerto JTAG para depurar los programas.



## Tarjeta de desarrollo ARDUINO MEGA

El Arduino Mega es una tarjeta de desarrollo para el microcontrolador basado en el ATMEGA 2560, tal como se observa en la figura 11. Tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 14 proporcionan salida PWM), 16 entradas digitales, 4 UARTS (puertos serie por hardware), un cristal oscilador de 16 MHz, conexión USB, entrada de corriente, conector ICSP y botón de reset. Contiene todo lo necesario para hacer funcionar el  $\mu C$ , solamente hay que conectarlo al ordenador con el cable USB o suministrar la energía con una fuente o batería. La tarjeta de desarrollo es compatible con la mayoría de los expansores de módulos diseñados para el ARDUINO, lo cual se verá en los siguientes capítulos.

### Pantalla de cristal líquido (LCD)

Una pantalla de cristal líquido o LCD (siglas del inglés liquid crystal display) es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos colocados delante de una fuente de luz o reflectora. A menudo se utiliza en dispositivos electrónicos con baterías, ya que utiliza cantidades muy pequeñas de energía eléctrica. Los LCD que utiliza la tarjeta ARDUINO MEGA son generalmente con el driver Hitachi HD44780. En la figura 12 se muestra un LCD típico.

El LCD tiene una interfaz paralela, por lo que el  $\mu C$  tiene que manipular varios pines a la vez para controlarlo. La interfaz consta de los siguientes pines:

- Un pin de selección de registro (RS) que controla en qué parte de la memoria del LCD se está escribiendo datos. Se puede seleccionar bien el registro de datos, que mantiene lo que sale en la pantalla, o un registro de instrucción, que es donde el controlador del LCD busca las instrucciones para saber cual es lo siguiente que hay que ejecutar.

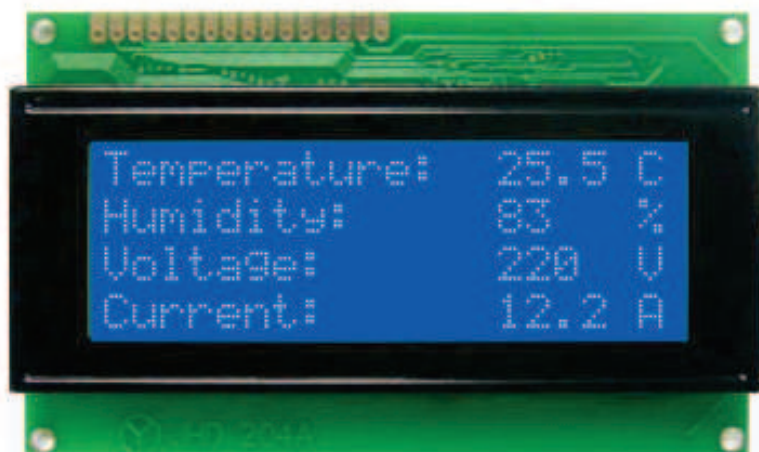


Figura 12: LCD 20x4 utilizado en este trabajo de tesis.  
Recuperado de Pantalla LCD [Online] (20 de Mayo de 2011)

- El pin de lectura/escritura (R/W) que selecciona el modo de lectura o el de escritura.
- Un pin para habilitar (enable) los registros.
- 8 pines de datos (D0-7). Los estados de estos pines (nivel alto o bajo) son los bits que se están escribiendo a un registro, o los valores de lectura cuando se está leyendo.
- Un pin de contraste del display (Vo), pines de alimentación (+5V y GND) y pines de iluminación trasera (Bklt+ y Bklt-) que permiten alimentar el LCD, controlar el contraste del display, o encender y apagar la luz de fondo, respectivamente.

Los LCD compatibles con Hitachi pueden ser controlados de dos modos: 4 bits u 8 bits. El modo de 4 bits requiere de 7 pines de E/S del microcontrolador, mientras el modo de 8 bits requiere 11 pines. El proceso de controlar el display involucra la colocación de los datos que componen la imagen de lo que quiere mostrar, en los registros de datos, y luego, colocar las instrucciones, en el registro de instrucciones. **La**

biblioteca **LiquidCrystal** contiene todo este proceso de forma que no se necesita ingresar a lenguaje de bajo nivel, solamente utilizar dicha biblioteca con los comandos pre-establecidos.

### Teclado

Un teclado matricial es un simple arreglo de botones conectados en filas y columnas, de modo que se puede leer los botones con el mínimo número de pines requeridos. Un teclado matricial 4x4, que se describe en la figura 13 solamente ocupa 4 líneas de un puerto para las filas y otras 4 líneas para las columnas, de este modo se pueden leer 16 teclas utilizando solamente 8 líneas de un  $\mu C$ .

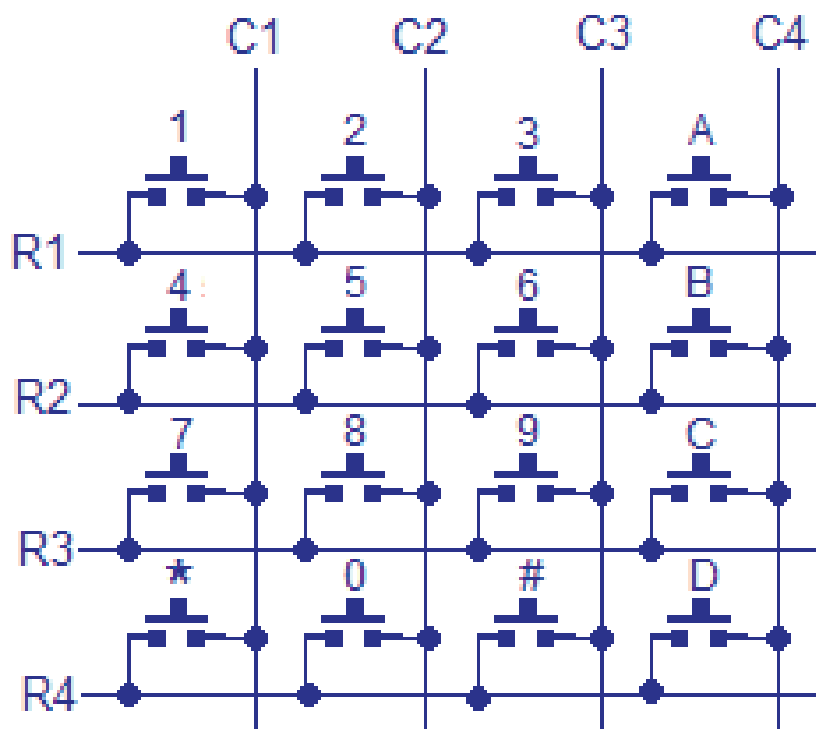


Figura 13: Esquemático de un teclado matricial 4x4.  
Recuperado de Teclado matricial [Online] (20 de Mayo de 2011)

Por ejemplo, si se asume que todas las columnas y filas inicialmente están en nivel alto (1 lógico), la pulsación de un botón se puede detectar al poner cada fila en bajo

(0 lógico) y checar cada columna en busca de un cero, si ninguna columna está en bajo entonces el 0 de las filas se recorre hacia la siguiente y así secuencialmente, esto se puede observar en la figura 14, la cual muestra la conexión de la tarjeta ARDUINO con un teclado, el siguiente programa permite obtener la tecla presionada:

```
#include <Keypad.h>
```

```
char keys[4][4]={
    { '1', '2', '3', 'A' },
    { '4', '5', '6', 'B' },
    { '7', '8', '9', 'C' },
    { '*', '0', '#', 'D' } };
```

```
byte rowPin[4]={5,6,7,8};
```

```
byte colPin[4]={9,10,11,12};
```

```
Keypad keypad=Keypad(makeKeymap(keys),rowPin,colPin,4,4);
```

```
void setup()
```

```
{
    Serial.begin(9600);
}
```

```
void loop()
```

```
{
    char pressed=keypad.getKey();
    if(pressed)
    {
        Serial.println(pressed);
    }
}
```

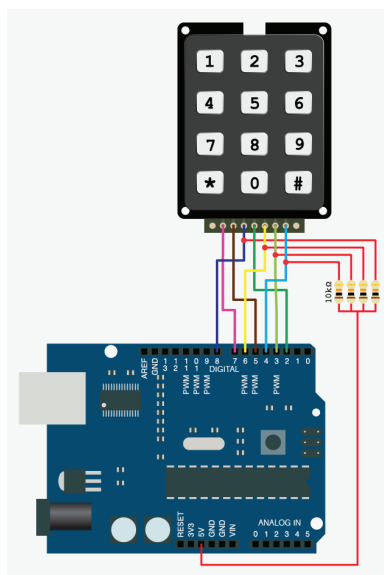


Figura 14: Conexión de un ARDUINO con un teclado matricial 4x4

## EEPROM

La memoria EEPROM son las siglas de Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (ROM programable y borrable eléctricamente). Presenta una diferencia de la EPROM, dado que está ha de borrarse mediante un aparato que emite luz ultravioleta. Son memorias no volátiles. Las celdas de memoria de una EEPROM están constituidas por un transistor MOS, que tiene una compuerta flotante de estructura SAMOS(Apilado avalancha de compuertas de inyección de semiconductor metal-óxido), su estado normal de funcionamiento está en alto y la salida proporciona un 1 lógico. Aunque una EEPROM puede ser leída un número ilimitado de veces, sólo puede ser borrada y reprogramada entre 100,000 y un millón de veces. Estos dispositivos suelen comunicarse mediante protocolos como  $I^2C$ , SPI y Microwire. **En este trabajo de tesis se utiliza la EEPROM interna del  $\mu C$  Arduino para guardar los números telefónicos y los valores máximo y mínimo para la activación de mensajes SMS.**

## Conversión analógica a digital (ADC)

La digitalización o conversión analógica-digital (conversión AD) consiste básicamente en realizar medidas de la amplitud de una señal (e.g el sensor de oxígeno disuelto), un tiempo suficiente para permitir evaluar su nivel (cuantificación).

- Cuantificación: en el proceso de cuantificación se mide el nivel de voltaje de cada una de las muestras. Consiste en asignar un margen de valor de una señal analizada a un único nivel de salida. Incluso en su versión ideal, añade, como resultado, una señal indeseada a la señal de entrada: el ruido de cuantificación.
- Codificación: la codificación consiste en traducir los valores obtenidos durante la cuantificación al código binario.

A partir de la cuantificación, cuando la señal ya toma valores finitos, la señal ya es digital.

## II.4 Comunicación en sistema embebido

Desde un punto de vista técnico, se entiende por comunicación el hecho que un determinado mensaje originado en el punto A se envíe a otro punto determinado B, distante del anterior en el espacio, sus elementos principales son:

- Código. El código es un sistema de signos y reglas que son combinados, utilizados para poder descifrar el mensaje para el receptor, por parte del emisor.
- Canal. El proceso de comunicación que emplea ese código precisa de un canal para la transmisión de las señales. El Canal sería el medio físico a través del cual se transmite la comunicación.
- Emisor. Es la entidad que se encarga de transmitir el mensaje. Esta entidad elige y selecciona los signos que le convienen, es decir, realiza un proceso de codificación.

- El receptor será aquella entidad a quien va dirigido el mensaje; realiza un proceso inverso al del emisor, ya que descifra e interpreta los signos elegidos por el emisor.

### II.4.1 Módulo USART

Este periférico está presente en casi cualquier microcontrolador, normalmente en forma de UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) o USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter).

El uso común de este periférico es la comunicación con otro microcontrolador o con una PC y en la mayoría de los casos hay que agregar circuitos externos para completar la interfaz de comunicación. La forma más común de completar el puerto serie es para comunicarlo con una PC mediante la interfaz EIA-232 (más conocida como RS-232). En aplicaciones industriales se utiliza preferiblemente RS-485 por sus superior alcance en distancia, velocidad y resistencia al ruido.

### II.4.2 Comunicación I2C

$I^2C$  es un bus de comunicaciones en serie. Su nombre viene de Inter-Integrated Circuit (Inter-Circuitos Integrados). La velocidad es de 100 Kbit/s en el modo estándar, aunque también permite velocidades de 3.4 Mbit/s. Es un bus muy usado en la industria, principalmente para comunicar microcontroladores y sus periféricos en sistemas integrados (Embedded Systems) y para comunicar circuitos integrados entre si que normalmente residen en un mismo circuito impreso, un ejemplo de ello se ilustra en la figura 15

La principal característica de  $I^2C$  es que utiliza dos líneas para transmitir la información: una para los datos y otra para la señal de reloj, además de las líneas de alimentación y tierra.

Las líneas se llaman:

- SDA: Señal de datos.

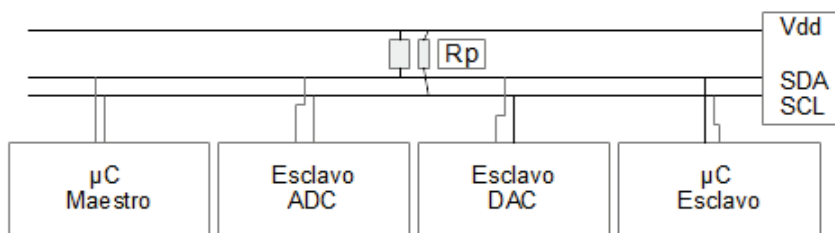


Figura 15: Ejemplo esquemático con un maestro (un microcontrolador) y tres nodos esclavos (un ADC, un DAC, y otro microcontrolador) con resistencias pull-up  $R_p$ .

- SCL: Señal de reloj.
- VCC: Voltaje de entrada.
- GND: Tierra.

Las dos primeras líneas son drenador abierto, por lo que necesitan resistencias de pull-up.

Los dispositivos conectados al bus  $I^2C$  tienen una dirección única. También pueden ser maestros o esclavos. El dispositivo maestro inicia la transferencia de datos y genera la señal de reloj, pero no es necesario que el maestro sea siempre el mismo dispositivo, esta característica se la pueden ir pasando los dispositivos que tengan esa capacidad. Esta característica hace que al bus  $I^2C$  se le denomine bus multimaestro.

### II.4.3 Puerto USB

El puerto Universal Serial Bus es más conocido por la siglas USB, es un bus estándar industrial que define los cables, conectores y protocolos usados en un bus para conectar, comunicar y proveer de alimentación eléctrica entre computadoras, periféricos y dispositivos electrónicos Axelson (2015).

Las señales del USB se transmiten en un cable de par trenzado con impedancia característica de  $90\Omega \pm 15\Omega$ , cuyos hilos se denominan  $D^+$  y  $D^-$ . Éstos, colectivamente, utilizan señalización diferencial en half dúplex (excepto el USB 3.0 que utiliza



un segundo par de hilos para realizar una comunicación en full dúplex). La razón por la cual se realiza la comunicación en modo diferencial es simple, reduce el efecto del ruido electromagnético en enlaces largos. D+ y D- suelen operar en conjunto y no son conexiones simples. Los niveles de transmisión de la señal varían de 0 a 0.3 V para bajos (ceros) y de 2.8 a 3.6 V para altos (unos), en las versiones 1.0 y 1.1, y en  $\pm 400$  mV en alta velocidad (2.0). Este puerto sólo admite la conexión de dispositivos de bajo consumo, es decir, que tengan un consumo máximo de 100 mA por cada puerto; sin embargo, en caso de que estuviese conectado un dispositivo que permite 4 puertos por cada salida USB (extensiones de máximo 4 puertos), entonces la energía del USB se asignará en unidades de 100 mA hasta un máximo de 500 mA por puerto. Con la primera fabricación de un PC con USB 3.0 en 2009, ahora tenemos 1 A (un amperio) por puerto, lo cual da 5 W (cinco vatios) en lugar de 0,5 A (500 mA, 2,5W) como máximo.

La tarjeta Arduino ya cuenta con la conexión directamente por el puerto USB, para programación del  $\mu C$  o como puerto de comunicación serie, a través del chip FTDI, como se observa en la figura 16:

#### II.4.4 Protocolo IEEE 802.15.4 (Zigbee)

ZigBee es el nombre de la especificación de un protocolo de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área (personal wireless personal area network) WPAN. Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías Faludi (2010).

Sus características que lo diferencian de otras tecnologías:

- Bajo consumo.

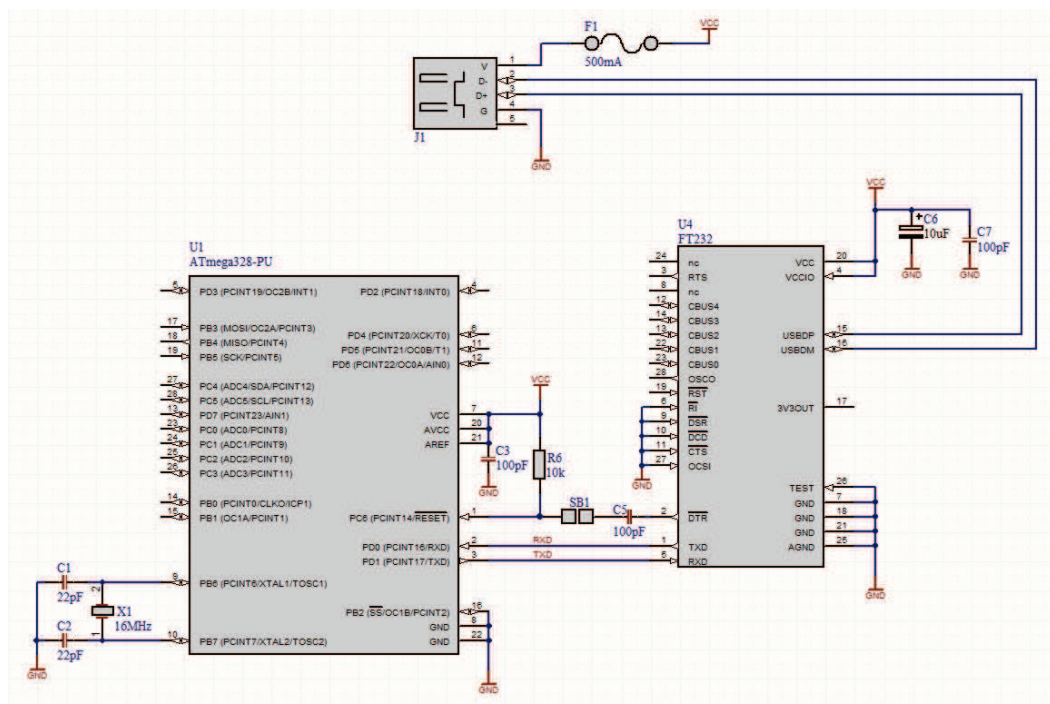


Figura 16: ATMEGA conectado con chip FTDI para comunicación USB.

- Topología de red en malla.
- Fácil integración (se pueden fabricar nodos con muy poca electrónica).

Se definen tres tipos distintos de dispositivo ZigBee según su papel en la red:

- Coordinador ZigBee (ZigBee Coordinator, ZC). El tipo de dispositivo más completo. Debe existir al menos uno por red. Sus funciones son las de encargarse de controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos.
- Router ZigBee (ZigBee Router, ZR). Interconecta dispositivos separados en la topología de la red, además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario.
- Dispositivo final (ZigBee End Device, ZED). Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede

transmitir información destinada a otros dispositivos. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus bateías.

Como ejemplo de aplicación en Domótica, en una habitación de la casa se tendrá diversos Dispositivos Finales (como un interruptor y una lámpara) y una red de interconexión realizada con Routers ZigBee y gobernada por el Coordinador.

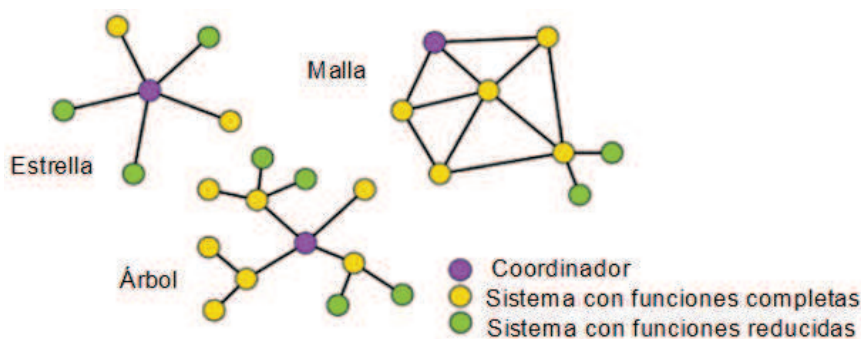


Figura 17: Formas de conectar la red Zigbee.

Algunas aplicaciones utilizando la comunicación Zigbee se han reportado en Vaddadi *et al.* (2012) y Wang *et al.* (2011).

## II.5 Especies marinas a monitorear

### II.5.1 Almeja generosa

También conocida comumente como almeja chiluda, como se puede observar en la figura 18, la almeja generosa vive en una zona de fondo fangoso de 3 a 15 brazas de profundidad. Se captura por buceo, se lleva a la planta procesadora y se coloca en pilas de agua de mar con temperatura y salinidad controladas. Se baja paulatinamente la temperatura para adormecerla. Se empaca en cajas de foam de 10 o 15 kg con esponjas isotérmicas y gel-ice. Las cajas de foam a su vez son puestas en cajas de cartón, algunos estudios sobre su pesca se encuentran en SAGARPA (2007) y González-Peláez

y Luch-Cota (2010).

Su mercado principal es el oriente y es uno de los platillos del mar más exóticos y solicitados en países como Estados Unidos, Canadá y Japón. En Oriente es conocida como *almeja trompa de elefante* y en Estados Unidos como "*geoduck*". Su color es blanco y llega a pesar desde 600 a 1,200 gramos. Su sabor es parecido al de la almeja pismo y su consistencia similar al caracol de mar. Con la almeja generosa se preparan exquisitos cocteles, botanas, ensaladas, cremas, sopas o ceviche. Cuenta con un alto valor nutricional y bajo contenido de colesterol, citado en Almeja Generosa [Online] (20 de Mayo de 2011).



Figura 18: Almeja generosa

### II.5.2 Langosta roja

La langosta roja de California es un crustáceo de la familia Palinuridae , tal como se muestra en la figura 19.

En promedio mide unos 30 cm de longitud, pero puede alcanzar hasta 60 cm. Los

machos pueden llegar a pesar hasta 12 kilogramos. Por encima es de color rojo pardusco, sin las bandas más pálidas o manchas vistas en algunas otras langostas. Las patas son de un color similar, pero con una o más rayas delgadas a lo largo. En el destacan dos ojos protuberantes protegidos por sendas proyecciones espinosas. Tiene 10 patas, tal como se describe en (Lipke, 1991).

En el Pacífico Norte y Baja California Sur, desde la Isla Guadalupe hasta Punta Abreojos y San Juanico, se pesca más del 90 por ciento del abulón, caracol y langosta roja del país. La calidad y el sabor del producto, derivadas de su alimentación natural y un proceso de elaboración libre de químicos, va de la mano con las acciones emprendidas por un grupo de cerca de 1475 socios para preservar el medio ambiente. Entre ellas, destaca el no sobreexplotar a las especies que comercializan, por lo que está prohibido pescar productos menores a la talla mínima establecida, así como rebasar la cuota permisible de acuerdo a la biomasa total existente, así que se han establecido períodos de veda. El área está clasificada como zona natural protegida y se cuenta con un proyecto piloto de reservas marinas, tema de gran pertinencia en un momento en que algunas de las especies más comerciales corren el riesgo de desaparecer.

La pesca de cada día en altamar se entrega en la planta, tras lo cual se procede a seleccionar las mejores piezas, teniendo cuidado de no maltratar la calidad de su textura natural. La técnica y la experiencia asiáticas dominadas por el personal involucrado en la planta fue transmitida a las siguientes generaciones. Hoy, los jóvenes se preparan en nuevas técnicas y salen a formarse a otros sitios, apoyados por las mismas cooperativas, para que a su regreso aporten innovaciones. Langosta Roja de Baja California [Online] (20 de Mayo de 2011).



Figura 19: Imagen de una langosta roja.

## II.6 Totoaba

La UBP(Unidad de Biotecnología en Piscicultura) durante los últimos 14 años se ha dedicado a desarrollar la biotecnología para el cultivo de la Totoaba, en la figura 20 se puede observar la especie de la familia Sciaenidae endémica al Alto Golfo de California y catalogada en peligro de extinción. El proyecto inició en 1994 con la colecta de 12 reproductores del área cercana a San Felipe. Se adapta rápido al cautiverio y acepta alimento inerte. La maduración se ha logrado mediante control foto-térmico emulando las condiciones del medio natural en un ciclo anual. Su desarrollo larvario es muy rápido logrando en una talla de 50 cm en el primer año de vida. A la fecha se han liberado 10,000 juveniles de 4 meses de edad al Alto Golfo con el fin de coadyuvar en la recuperación de la especie. Unidad de Biotecnología en Piscicultura [Online] (20 de Mayo de 2011)

Constituyó una pesquería comercial y deportiva que sin duda fue una de las más importantes, y tal vez de las más cortas que ha tenido el país. Se basaba en el aprovechamiento de las migraciones que realizaba esta especie para su reproducción, una vez al año durante el verano, a las aguas someras y salobres de la región del delta y desembocadura del Río Colorado. La razón para el desarrollo de esta pesquería no fue la calidad de la carne, que en la mayoría de los casos es el motivo principal. La extracción de la vejiga natatoria ó *Buche*, que es un órgano interno que los peces utilizan para regular su flotabilidad, fue el motivo fundamental. Lo increíble es que el

precio por este producto llegó a cotizarse hasta 5 dólares la libra, originando que los pescadores se olvidaran por completo de la calidad de la carne de la totoaba, donde tal producto era abandonado en las playas, y nadie puede saber cuantas miles de toneladas de carne fueron desperdiciadas. El buche era exportado a San Francisco California (E.U.A.) y de allí al oriente, donde gozaba de gran popularidad como elemento indispensable para la elaboración de sopas gelatinosas. Hasta 1920 la producción de totoaba se restringía únicamente a la exportación de *buche* a oriente. La producción empezó a incrementarse marcadamente a partir de 1934, alcanzando un máximo en 1942 con 2,261 toneladas. Después de este año a pesar del incremento en esfuerzo y eficiencia del equipo de pesca, la producción fluctuó y llegó al mínimo de 58 toneladas, en 1975, a partir de este año se declaró la veda total, prohibiendo su pesca, protegida por la NOM-SEMARNAT-059-2001.



Figura 20: Imagen de una totoaba.

## II.7 Conclusión

Las variables físico-químicas presentes en los medios de acuicultura contribuyen en el desarrollo de las especies marinas, dependiendo de su magnitud pueden provocar un cultivo sano o la mortandad del mismo, por lo cual se requiere del constante monitoreo de dichas variables, esto se puede dar con el uso de instrumentos electrónicos, tal como los sensores ISE y los microcontroladores, que permiten realizar de forma automatizada este proceso y proteger al cultivo en todo tiempo.

# Capítulo III

## Programación e implementación del sistema embebido

En este capítulo se presenta la etapa de adecuación de señal y la programación necesaria en el  $\mu C$  para obtener correctamente la información que proviene de los sensores, mediante el uso de circuitos analógicos y digitales, además de su complemento para el usuario al contener una pantalla LCD y un teclado para la activación de las alarmas SMS, que se explica en el capítulo IV.

### III.1 Circuitos analógicos

En esta sección se presenta la etapa de acondicionamiento de señal utilizando amplificadores operacionales(OP-AMP), para el sensor de oxígeno disuelto y el sensor de pH.

#### III.1.1 Sensor de oxígeno disuelto de uso industrial

El sensor de uso industrial, marca Sensorex modelo DO6400 contiene las siguientes características:

- Rango de medición: 0.5-20 ppm
- Material externo: Noryl
- Cátodo de plata
- Ánodo de zinc



- Temperatura máxima: 50 grados
- No requiere voltaje externo
- Sin sensor de temperatura
- 3 metros de longitud de cable
- Requiere de 2 pulg/segundo de flujo de agua

En la figura 21 se puede observar es el sensor utilizado y la figura 22 su esquemático:



Figura 21: Sensor de oxígeno disuelto para uso industrial.

### **Circuito de acondicionamiento de señal**

Como se mencionó anteriormente, en la realización de este trabajo de tesis se utiliza un sensor con celda galvánica, el cual tiene la ventaja de no necesitar un voltaje externo, sin embargo, dado que el sensor tiene una impedancia muy alta, es necesario un acondicionamiento de señal, el cual se muestra en la figura 23 para obtener dicha relación corriente-voltaje y realizar su medición mediante el  $\mu C$  con el puerto ADC.

Este OP-AMP de instrumentación contiene las siguientes características relevantes:

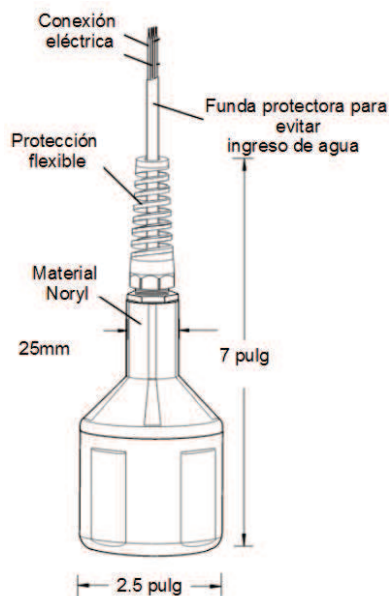


Figura 22: Esquemático del sensor de oxígeno disuelto para uso industrial.  
Recuperado de Hoja de datos de sensor DO6400 [Online] (20 de Mayo de 2011).

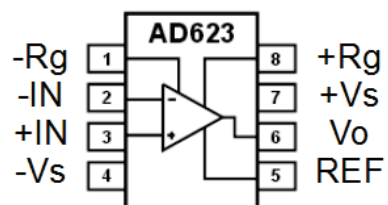


Figura 23: Esquemático del OP-AMP AD623.

- Puede funcionar con una fuente de 3V hasta 12 V, o una fuente dual de  $\pm 6V$ .
- Un rango de entrada mínimo de 150 mV con fuente sencilla.
- De bajo poder de consumo ( $550 \mu A$ ).
- Rango de ganancia de 1 hasta 1000.
- 800 KHz de ancho de banda (con  $G=1$ ).
- Una impedancia de entrada de  $2G\Omega$ .
- Entre sus aplicaciones son instrumentación médica, interfaz de transductores, procesos industriales, adquisición de datos, etc.

En el diseño de la instrumentación se realizó lo siguiente:

- Contiene una ganancia de  $G=125$ , que es para multiplicar el voltaje de 40mV a 5V, el cual se utilizará en el  $\mu C$ .
- Es alimentado por una fuente de 12 V.
- Se realizó una tierra virtual con 2 resistencias de  $10\Omega$  a  $1/2$  W, para obtener un voltaje  $\pm$  de 6V para alimentar el OP-APM.
- Se utilizaron 2 capacitores de  $10.1\mu F$  para desacoplar el OP-APM de la fuente de poder.

La desventaja de utilizar dicho circuito, es la necesidad de una fuente dual de  $\pm 6V$ , utilizando las 2 resistencias ya mencionadas para una tierra virtual, mostrando una interconexión del sistema en la figura 24, dado que se da una inestabilidad a largo plazo con el uso de estas resistencias, se sugiere utilizar los reguladores de voltaje 7812 y

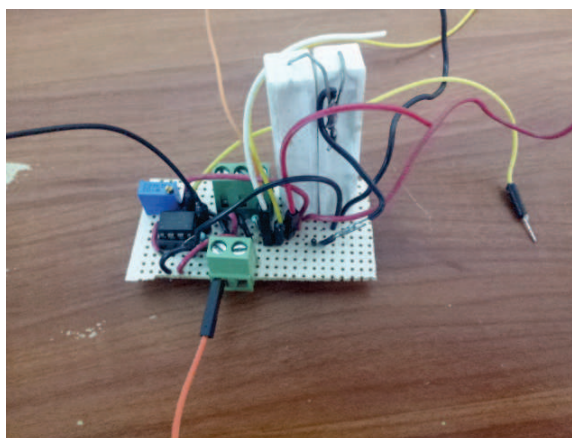


Figura 24: Circuito en PCB para AD623 con ganancia variable.

7912. Finalmente se ilustra en la figura 24 el circuito PCB realizado para el sensor de oxígeno disuelto, el cual contiene una resistencia lineal para ganancia variable.

El siguiente circuito muestra la obtención del voltaje del sensor:

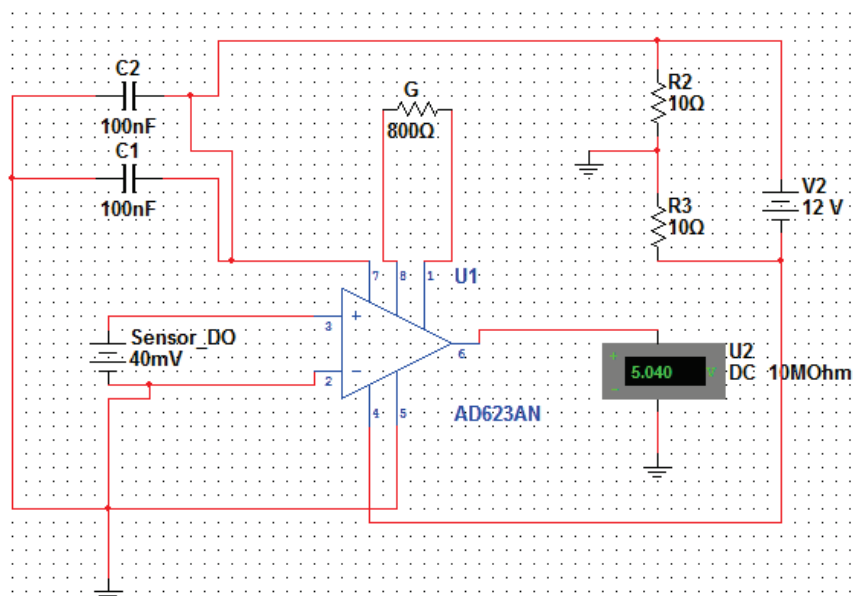


Figura 25: Realización de circuito del AD620 en software Multisim.

En el diagrama de la figura 25, el voltaje de **Sensor DO** corresponde al valor del sensor al estar 100 por ciento saturado de oxígeno, lo cual se obtiene una medición de 40mV y 0mV al estar sin oxígeno disuelto en el medio, dicho incremento en voltaje es

lineal. Al ser amplificado por el OP-AMP se obtiene un voltaje de 5V, los necesarios para obtener una escala completa en el  $\mu C$  sin necesidad de realizar un mapeo de voltaje posteriormente.

### III.1.2 Sensor de pH para uso industrial

El sensor de pH para uso industrial Marca Phidgets modelo 3551<sub>0</sub> – *PC2121* – 5*M* cuenta con las siguientes características:

- Electrodo de combinación simple
- Rango de medición de 0 a 14
- Tiempo de respuesta del sensor: 10 segundos
- Soporta temperaturas desde 0 a 110 grados centígrados.
- Plástico PPS como material exterior
- Presión máxima soportada: 87 psi
- Conector BNC

A continuación, en la figura 26 se muestra una fotografía del sensor utilizado en este trabajo de tesis:

### Circuito de acondicionamiento de señal para pH

Para la medición del sensor de pH, es necesario considerar las siguientes características para un OP-AMP, debido a las propiedades electrónicas presentes en el electrodo de pH:

- Entrada del OP-AMP con alta impedancia y capacidad de ganancia variable.
- Una etapa de OP-AMP para controlar las variaciones por offset.



Figura 26: Sensor de pH para uso industrial.  
 Recuperado de Sensor de pH para uso industrial [Online] (20 de Mayo de 2011).

- Capacitores para filtro de ruido y desacoplo.
- Fuente de voltaje positiva y negativa.

Por ejemplo, si un electrodo tiene una impedancia de  $100\text{M}\Omega$  por  $1\text{nA} = 0.1\text{V}$ , lo cual implica que un cambio de  $1\text{nA}$  (por ruido u offset), puede provocar un cambio de la medición de hasta 2 niveles de pH.

El electrodo de pH, idealmente, tiene la siguiente salida de voltaje:

- En pH igual a 7, la salida es 0 volts.
- Valores menores a 7 pH, son  $-59\text{mV/unidad de pH}$ .
- Valores mayores a 7 pH, son  $+59\text{mv/unidad de pH}$ .
- En valores cercanos a pH 1 y mayores a pH 12, los electrodos de pH se encuentran saturados y no es posible una medición del valor exacto de la muestra.

El diseño que se seleccionó utiliza es una etapa con OP-AMP de instrumentación, con cierto valor de ganancia, es decir, un circuito que permite separar la alta impedancia del electrodo con el equipo de medición, en este caso el microcontrolador, además permite

verificar los valores en mV del sensor, al ser puestos en diferentes muestras y comprobar el valor real respecto al valor ideal, en este proceso se utilizó un AD623, posteriormente se pueden utilizar OP-AMP como el LM324 o LM741 para realizar un offset a dicho voltaje y obtener un voltaje de 0-5V para el microcontrolador. La figura 27 muestra el diagrama electrónico del circuito de acondicionamiento de señal para el electrodo de pH.

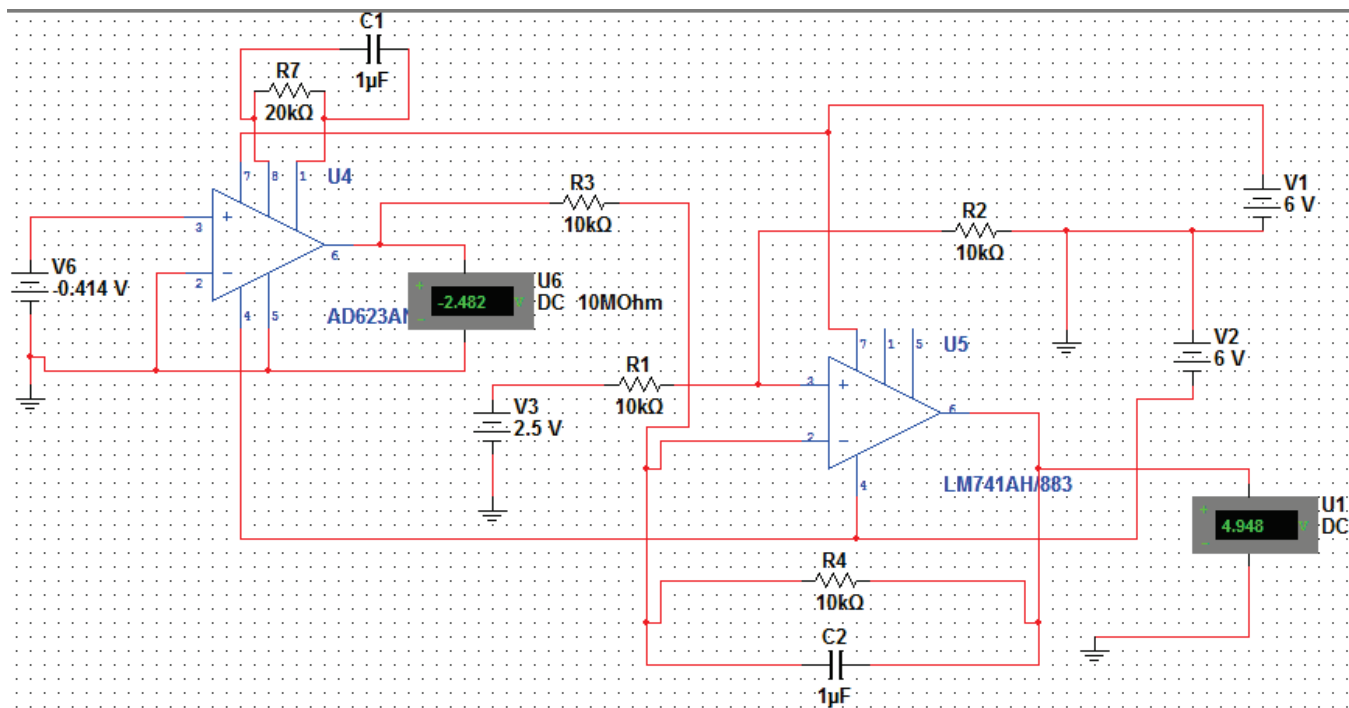


Figura 27: Circuito compuesto de 2 etapas de acondicionamiento de señal para el electrodo de pH.

En la selección de un circuito adecuado para el microcontrolador, se propone lo siguiente:

- La variable  $G$  como ganancia, la cual se escoge con valor de 6.
- El voltaje de salida  $V_o$  debe estar en el rango de 0V a 5V.
- El voltaje de entrada  $V_{in}$  que proviene del voltaje medido por el sensor de pH.

Los cálculos, para la realización de las etapas, son los siguientes:

1. Se obtiene el voltaje del sensor de pH mediante el AD620, este voltaje es amplificado para ser utilizado posteriormente.
2. Los valores máximo y mínimo del electrodo de pH son  $\pm 0.414$  V. Se utiliza el OP-AMP en modo no inversor, lo cual nos arroja la ecuación  $(1+G)V_{in}$  para la ganancia. El valor de  $V_{out}$  entonces es  $6 \cdot 0.414$ , que es 2.484V.
3. El valor de  $V_{out}$  en la salida más ácida debe de ser igual a 5V, lo cual es la suma de  $V_{in} + V_{offset}$
4. El valor de  $V_{out}$  en la salida básica debe de ser igual a 0V, lo cual es la suma de  $-V_{in} + V_{offset}$
5. El  $V_{offset}$  se establece con 2.5V Por lo que el rango de salida efectivo es el siguiente:
6.  $V_{low} = -V_{in} + V_{offset} = -2.48 + 2.5 = 0.02$  V.
7.  $V_{high} = V_{in} + V_{offset} = 2.48 + 2.5 = 4.98$  V.
8. Se utiliza OP-AMP en modo diferencial, mediante una etapa offset, se utiliza un capacitor para estabilidad y reducción de ruido a ciertas frecuencias.

Las ganancias son las siguientes:

$$G1 = 1 + (R2/R1) = 5.7$$

$$G2 = 1 + (R4/R3) = 2$$

Después de la realización de las pruebas, los valores para las resistencias son:

$$R1 = 47K\Omega.$$

$$R2, R3, R4 = 200K\Omega.$$

$$R5 = 3.3 \text{ a } 4.7 K\Omega.$$

$$C1 \text{ y } C2 = 1\mu F.$$



Por parte del fabricante del sensor de uso industrial, existe un circuito de acondicionamiento de señal, el cual se ilustra en la figura 28



Figura 28: Adaptador de sensor de pH para microcontrolador, fabricado por la compañía Phidgets.

Recuperado de Circuito adaptador de pH para microcontroladores [Online] (20 de Mayo de 2011).

El cual contiene la ecuación 20 para obtener el valor de pH:

$$pH = 7 - \frac{2.5 - V_{in}}{0.0257179 + (0.000941460 \cdot Temperatura)}. \quad (20)$$

Dicho circuito ademas contiene los errores de offset y drift, por lo cual la ecuación 20 debe ajustarse a lo siguiente:

$$pH = 7 - \frac{(2.5 - V_{in} - a_0) \cdot b_0}{0.0257179 + (0.000941460 \cdot Temperatura)} \quad (21)$$

$a_0$  y  $b_0$  son coeficientes obtenidos al realizar la medición del sensor en el buffer de pH=7 y pH=4, obteniendo los valores de -0.10086 y 1.05764 respectivamente.

## III.2 Circuitos de comunicación serial

En esta sección se presentan los circuitos con comunicación USART, debido a la utilización de un circuito acondicionador para el sensor de salinidad, además de la ventaja de utilizar un circuito serie similar, para su uso con un sensor de oxígeno disuelto.

## Circuito EZO de salinidad

El **circuito de conductividad clase EZO version 3.0**, que se muestra en la figura 29 es un circuito digital específicamente diseñado para ser utilizado en aplicaciones para sistemas embebidos para mediciones precisas de conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (TDS) y salinidad (S) de agua de mar. Es importante tener en cuenta que el circuito de conductividad EZO sólo se puede utilizar para tomar mediciones en líquidos donde el disolvente es agua.

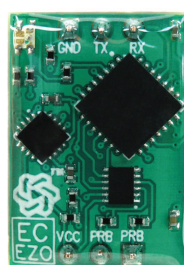


Figura 29: Circuito digital EZO para sensor de conductividad.  
Recuperado de Hoja de datos de circuito EZO de conductividad [Online] (20 de Mayo de 2011).

El circuito de conductividad EZO contiene 3 etapas:

1. La primera etapa del dispositivo es el controlador del sensor de conductividad, dado que el sensor de conductividad es un dispositivo pasivo. El circuito EZO transmite una onda cuadrada a diferentes frecuencias. Las frecuencias varían desde 23.81 Hz a 41.27 KHz, lo cual es absolutamente crítico para leer con precisión la conductividad.
2. La segunda etapa del circuito de conductividad EZO es la etapa de procesamiento de la señal analógica. Esta etapa también se conoce como la etapa de convolución. Aquí es donde se combina la señal de entrada con las funciones del sistema para encontrar la señal de salida.

3. La tercera etapa del circuito de conductividad EZO es el sistema operativo y etapa de comunicaciones. En esta etapa, un dispositivo maestro se comunica con el circuito de conductividad a través de la comunicación serie asíncrona UART / RS232 con un voltaje de oscilación de 0-5V.

El circuito EZO contiene una secuencia de arranque, la cual es desplegada por los LED que contiene, o al ser ledá por el puerto de comunicación serie. El LED pasa de rojo a verde y finalmente azul, como se muestra en la figura 30. La secuencia de arranque toma 1 segundo. Una vez que el dispositivo ha arrancado correctamente, en el puerto serie del microcontrolador se leerá lo siguiente:

*\*RS < CR >*

*\*RE < CR >*

Indicando que el dispositivo está listo para funcionar. El LED verde también permanece encendido, lo que indica que el circuito EZO esta en modo default.

#### Patrón de funcionamiento del LED

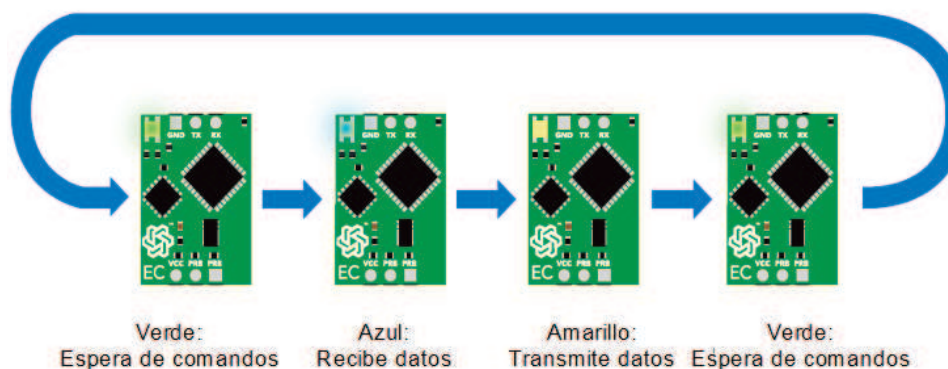


Figura 30: Modo de comunicación continua del circuito EZO para salinidad.  
Recuperado de LED de circuito EZO [Online] (20 de Mayo de 2011).

El circuito EZO se comunica a través de comandos ASCII. En la tabla IV se muestra una serie de comandos que pueden ser enviados manualmente, a modo de prueba, con una terminal de comunicación serie, en este trabajo de tesis se utilizó la terminal de

ARDUINO, posteriormente son enviados automáticamente a través del envío de dichos comandos mediante el microcontrolador.

| Command  | Function                                                     | Default state       |
|----------|--------------------------------------------------------------|---------------------|
| C        | Enable / Disable or Query continuous readings (pg.18)        | Enabled             |
| Cal      | Performs calibration (pg.24)                                 | User must calibrate |
| I        | Device information (pg.27)                                   | N/A                 |
| I2C      | Sets the I <sup>2</sup> C ID number (pg.33)                  | Not set             |
| K        | Set or Query the probe K constant (pg.20)                    | K 1.0               |
| L        | Enable / Disable or Query the LEDs (pg.17)                   | LEDs Enabled        |
| Name     | Set or Query the name of the device (pg.26)                  | Not set             |
| O        | Enable / Disable or Query parts of the output string (pg.22) | All Enabled         |
| R        | Returns a single reading (pg.19)                             | N/A                 |
| Response | Enable / Disable or Query response code (pg.28)              | Enabled             |
| Serial   | Set the baud rate (pg.31)                                    | 9600                |
| Sleep    | Enter low power sleep mode (pg.30)                           | N/A                 |
| Status   | Retrieve status information (pg.29)                          | N/A                 |
| T        | Set or Query the temperature compensation (pg.21)            | 25°C                |
| X        | Factory reset (pg.32)                                        | N/A                 |

Tabla IV: Lista de comandos para el circuito EZO.

Recuperado de Lista de comandos para circuito EZO [Online] (20 de Mayo de 2011).

En el diagrama de flujo de la figura 31, dicho circuito EZO espera el envío de un comando, en este caso se envía el valor de la temperatura, leída con el sensor previamente, y después se envía el comando **r** el cual envía al puerto serie la medición de la salinidad en ese momento.

La forma de envío automático de comandos, se muestra en las figuras 32 y 33, mediante los comandos de la figura IV:

Las figuras 32 y 33 muestra la obtención de los valores que puede otorgar el circuito EZO de salinidad y su debida conversión de formato ASCII a formato numérico, para ser desplegados en la pantalla LCD y en la interfáz gráfica. Parte de la programación del sensor de conductividad se encuentra en el apéndice A.0.1.

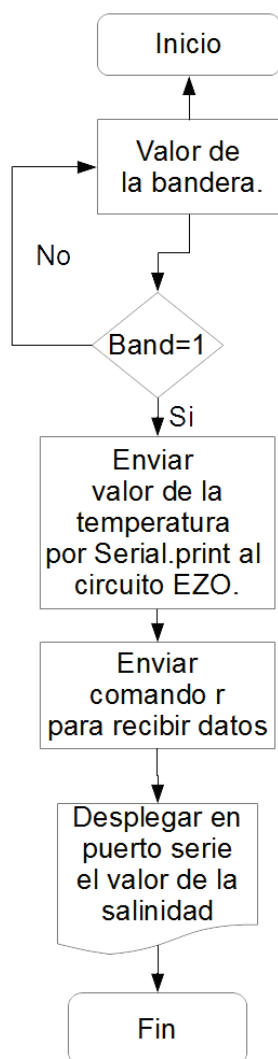


Figura 31: Diagrama de flujo para envío y recepción de 1 dato de salinidad

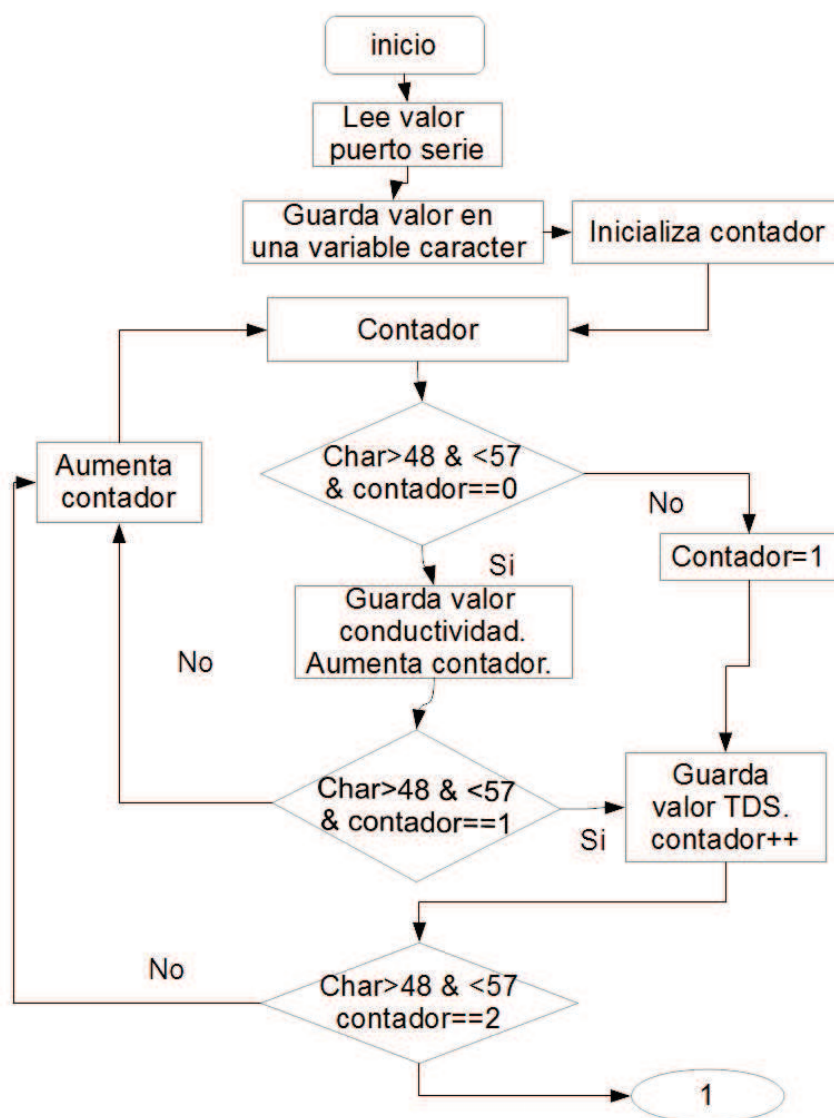


Figura 32: Diagrama de flujo para envío y recepción de salinidad, conductividad y TDS.

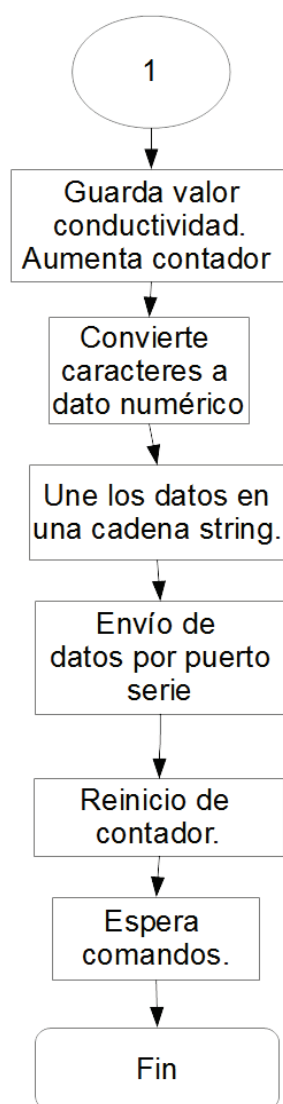


Figura 33: Diagrama de flujo para envío y recepción de salinidad, conductividad y TDS.

## Calibración del sensor de conductividad

Para obtener la precisión en la medición de la salinidad del agua de mar, que es el ambiente donde se encuentra funcionando el sistema, es necesario realizar los siguientes pasos para la calibración:

1. Utilizar el comando  $Cal, clear < CR >$ , para reiniciar los puntos de calibración.
2. Un punto de calibración en *seco*, que consiste en calibrar el sensor en su estado *seco*, lo cual implica que no esta sumergido en agua de mar, utilizando el comando  $Cal, dry < CR >$
3. Un segundo punto de calibración en un buffer de  $50000 \mu S$ , el cual es el valor promedio del agua de mar, utilizando el comando  $Cal, one, n < CR >$ , que se ilustra en la figura 34 con buffers de valor  $12880 \mu S$  y  $50000 \mu S$ .
4. Un tercer punto de calibración, que es opcional, permite obtener mayor precisión al establecer un valor máximo en el rango de medición, en este paso se utilizan los comandos  $Cal, low, n < CR >$  y  $Cal, high, n < CR >$ .



Figura 34: Buffer utilizados para calibración del sensor de conductividad.  
Recuperado de Buffer para circuito EZO [Online] (20 de Mayo de 2011).

La calibración con un segundo punto, permite obtener un rango de 400 por ciento más desde el segundo punto de calibración, en este caso, de  $200\ 000 \mu S$ , que es una propiedad contenida en el circuito digital, tal como se aprecia en la figura 35.



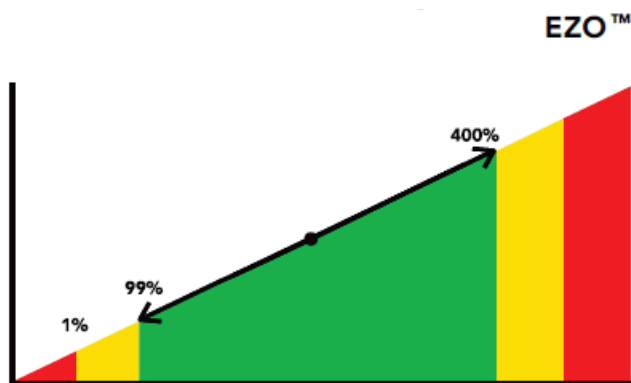


Figura 35: Relación de calibración usando 2 puntos.  
 Recuperado de Relación de rango de operabilidad con calibración [Online] (20 de Mayo de 2011).

### Sensor de conductividad

El sensor de conductividad marca Sensorex modelo CS200 utilizado en este trabajo de tesis contiene las siguientes características:

- Constante de celda:  $k=10$ .
- Placas de platino negro recubierto.
- Material externo: Epoxy.
- Temperatura de trabajo: 0 a 70 grados.
- Máxima presión soportada: 100 psi.
- Cable de 3 metros de longitud.

La figura 36 muestra el sensor utilizado y la figura 37 se puede observar su esquemático:



Figura 36: Sensor de conductividad de uso comercial e industrial.  
Recuperado de Sensor de conductividad [Online] (20 de Mayo de 2011).

### III.2.1 Circuito EZO para oxígeno disuelto

El circuito digital EZO para oxígeno disuelto, que se muestra en la figura 38, es un circuito para sistemas embebidos que requieren mediciones precisas del oxígeno disuelto en el agua, el cual requiere tener en cuenta la temperatura, la salinidad y la presión para obtener la concentración de oxígeno disuelto en el agua. La señal viene de un sensor galvánico HDPE (Polietileno de alta densidad), el cual tiene 0mV que significa que no hay oxígeno y un voltaje de 36mV a 54 mV que significa 100 por ciento de oxígeno.

Para determinar la información sobre el porcentaje de saturación se mide el valor de mV obtenido en el sensor DO, cuando está en el agua y dividir por el mV medido cuando el sensor DO se encuentra en el aire, tal como se muestra en la figura 39. Esto

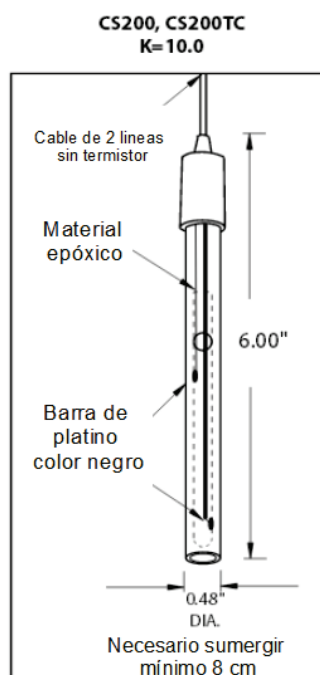


Figura 37: Esquemático del sensor de conductividad de uso comercial e industrial.  
Recuperado de Sensor de conductividad [Online] (20 de Mayo de 2011).

nos dice el porcentaje de saturación de oxígeno en relación con el aire. Para obtener el valor de mg/L de oxígeno disuelto, que es el valor más utilizado para las especies marinas, es necesario medir la temperatura, presión y salinidad, los cuales determinan la concentración de oxígeno en el agua, dicha ecuación esta descrita por Weiss (Weiss, 1970), la cual esta programada en el circuito EZO para oxígeno disuelto.

El circuito EZO esa programado con una secuencia de arranque, el cual funciona de manera similar al con el circuito EZO de salinidad, ilustrado en la figura 29, además de utilizar el mismo protocolo de comunicación con la terminal ARDUINO utilizando los comandos de la figura IV.

En el diagrama de flujo de la figura 40, dicho circuito EZO espera el envío de un comando para realizar una acción determinada, en este caso se envía el valor de la temperatura, leída con el sensor previamente, para obtener una medición mas exacta



Figura 38: Circuito EZO para sensor de oxígeno disuelto.  
Recuperado de Hoja de datos circuito EZO para DO [Online] (20 de Mayo de 2011).

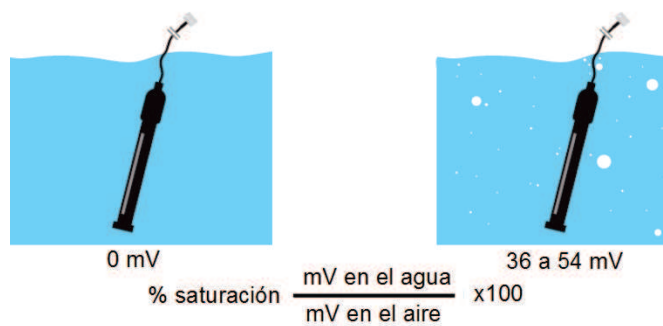


Figura 39: Figura que representa el cambio de mV del sensor de oxígeno disuelto.  
Recuperado de Hoja de datos circuito EZO para DO [Online] (20 de Mayo de 2011).

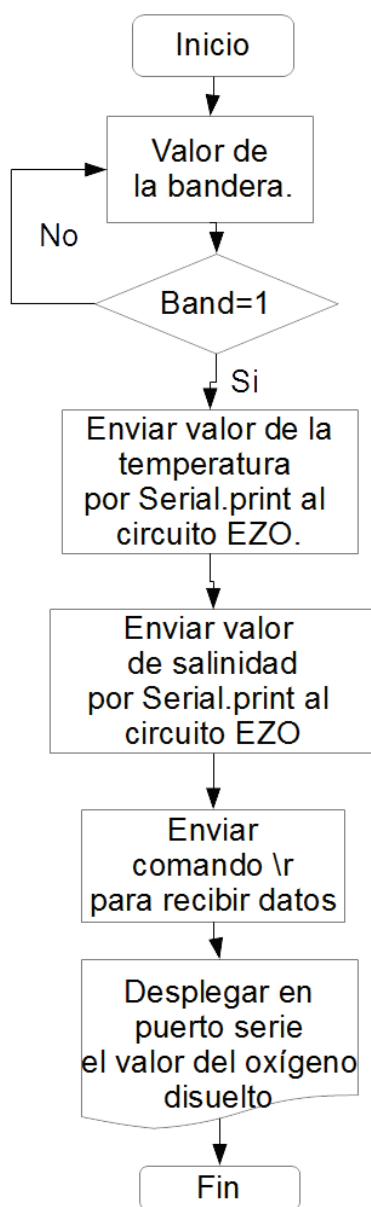


Figura 40: Diagrama de flujo para envío y recepción de 1 dato de oxígeno disuelto

del oxígeno disuelto, además se envía el comando s para el valor de la salinidad medido en ppt y después se envía el comando ° el cual envía al puerto serie la medición del oxígeno disuelto en ese momento.

La forma de envío automático de comandos, se muestra en las figuras 41 y 33:

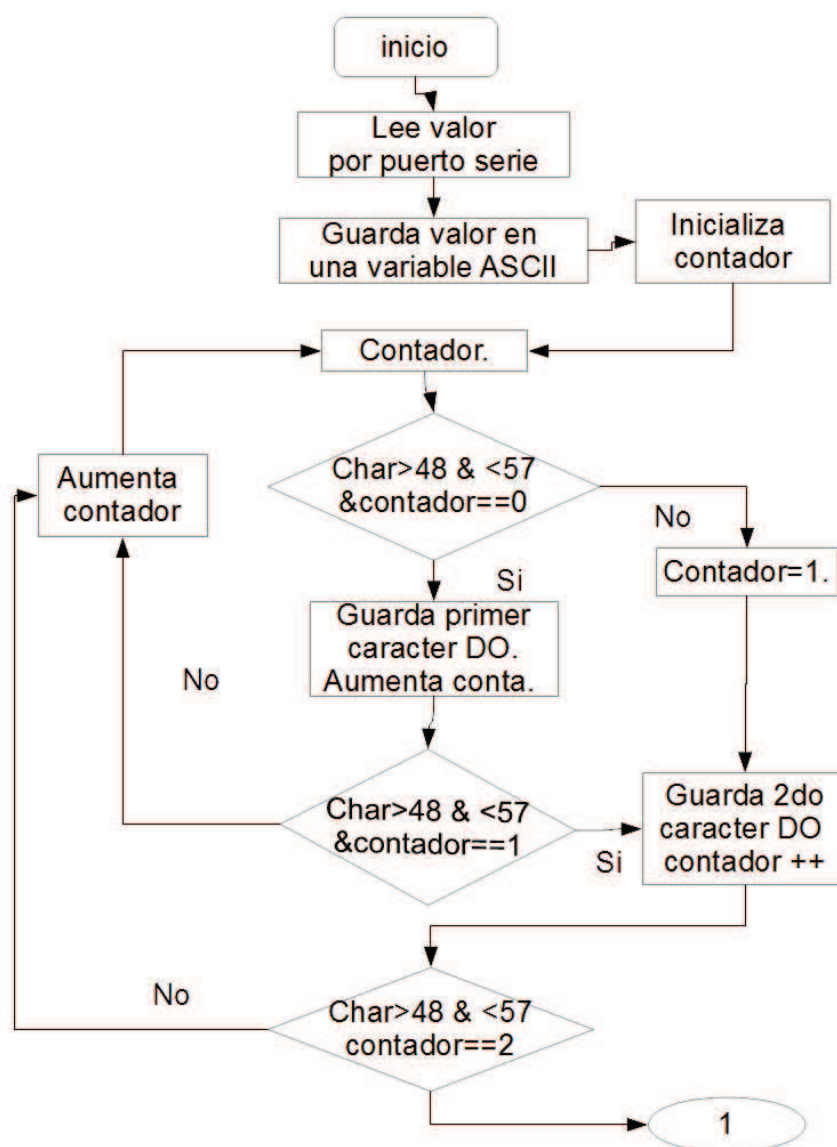


Figura 41: Diagrama de flujo para envío y recepción de oxígeno disuelto

En las figuras 41 y 42 se muestra la obtención del valor obtenido del sensor de oxígeno disuelto y su debida conversión de formato caracter a formato numérico, para

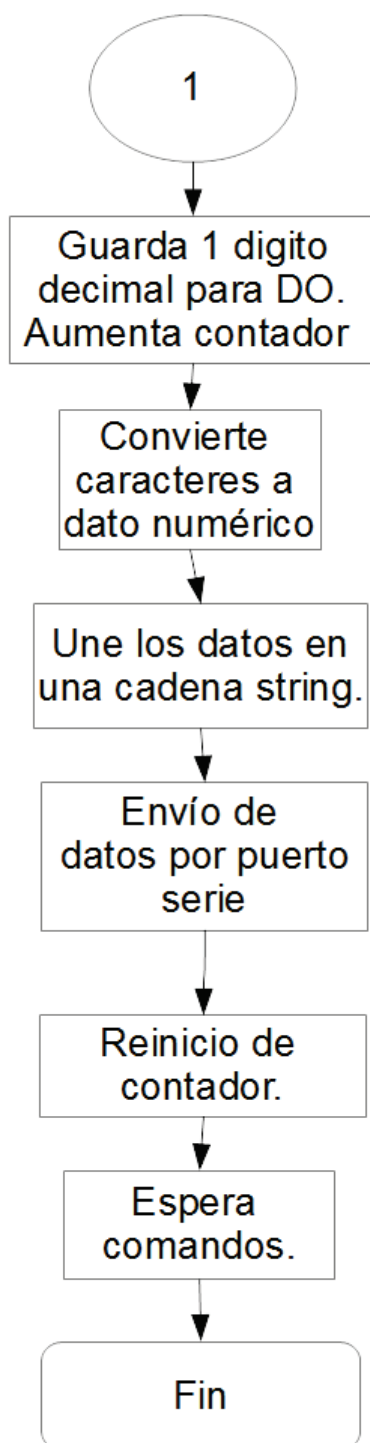


Figura 42: Continuación de diagrama de flujo para envío y recepción de oxígeno disuelto

ser desplegados en la pantalla LCD y en la interfáz gráfica.

Parte de la programación del sensor de DO, se encuentra en el apéndice, en el apartado A.0.2.

### Calibración del sensor de oxígeno disuelto

Para obtener la precisión en la medición del oxígeno disuelto en agua de mar, que es el ambiente donde se encuentra funcionando el sistema, es necesario realizar los siguientes pasos:

1. Utilizar el comando *Cal, clear < CR >*, para reiniciar los puntos de calibración.
2. Un punto de calibración en *seco*, que consiste en calibrar el sensor en su estado *seco*, utilizando el comando *Cal < CR >*.
3. Un segundo punto de calibración opcional es en buffer de 0 mg/L, tal como se muestra en la figura 43 el cual permite mayor precisión en mediciones menores a 1 mg/L, utilizando el comando *Cal, 0 < CR >*.



Figura 43: Buffer utilizados para calibración del sensor de oxígeno disuelto.  
Recuperado de Buffer de 0 mg/L [Online] (20 de Mayo de 2011).



### III.3 Cálculo de amoníaco libre ( $\text{NH}_3$ )

Para la medición del amoníaco libre ( $\text{NH}_3$ ) se ha de tomar en cuenta lo siguiente:

- Es necesario conocer la medición del total de amoníaco ( $\text{NH}_3 + \text{NH}_4$ ), lo cual requiere un sensor de  $\text{NH}_4$ , o en su método tradicional, el uso de reacciones químicas, por ejemplo en la figura 44 se muestra la diferencia de colores, dependiendo de la cantidad de TAN que contiene la muestra.
- El porcentaje de amoníaco libre es el mismo a un valor de pH y temperatura.

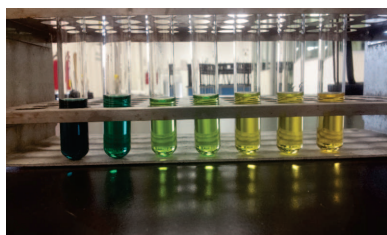


Figura 44: Muestras de TAN realizadas en laboratorio de usos múltiples UABC.

Uno de los sistemas de medición realizado en este trabajo de tesis, mostrando la parte frontal del sistema desarrollado, en las figuras 45, 46, 47, 48 y 49, tiene la capacidad de ingresar manualmente el valor de total de amoníaco, desde 0.25 mg/L hasta 8 mg/L, a partir de este valor se obtiene la fracción de amoníaco libre. Para la conversión del porcentaje de amoníaco libre a mg/L, se necesita realizar los siguientes pasos, tal como se describe por Thurston *et al.* (1979) y Whitfield (1974):

1. Se realiza la medición del TAN (Total de Amoníaco Nitrógeno).
2. Se realiza la conversión del TAN ( $\text{NH}_4^+$ ) a  $\text{NH}_3$ , multiplicando dicho valor por 17/18, que es valor máximo de  $\text{NH}_3$  que puede contener la muestra.

3. Se identifican los valores de pH y temperatura del medio, con lo cual se obtiene la fracción de  $\text{NH}_3$  de la muestra, desde 0.01 hasta 1.00, a partir de la ecuación de Emerson *et al.* (1975).
4. Dicha fracción se multiplica por el valor máximo de  $\text{NH}_3$  de la muestra, lo cual se obtiene el valor real de amoníaco libre.

A continuación se muestran algunos ejemplos de medición de amoníaco libre, con un nivel de TAN conocido.

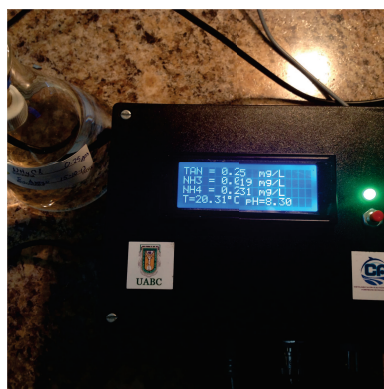


Figura 45: Muestras de TAN=0.25 mg/L medida con el sistema.



Figura 46: Muestras de TAN=0.5 mg/L medida con el sistema.

Como se aprecia en la mediciones, al tener el mismo valor de temperatura y pH, pueden existir diferentes niveles de TAN, lo cual implica que un cambio de 0.1 o 1



Figura 47: Muestras de TAN=1 mg/L medida con el sistema.



Figura 48: Muestras de TAN=2 mg/L medida con el sistema.



Figura 49: Muestras de TAN=8 mg/L medida con el sistema.

grado de pH sería riesgo al pasar los niveles de  $TAN > 1\text{mg/L}$ , debido al incremento exponencial de  $\text{NH}_3$ .

### III.4 Sensor digital de temperatura

El sensor de temperatura DS18B20 es un dispositivo que se comunica de forma digital, donde la información esta codificada de 9 a 12 bits. El sensor además cuenta con una función programable de alarma.

El DS18B20 se comunica a través del protocolo **1-wire**, por lo que requiere una línea de datos, voltaje de alimentación y tierra, los cuales se muestran en la figura 50, para comunicarse con el  $\mu C$ . Tiene un rango de temperatura de -55 a 125 grados Celsius, con una precisión de  $\pm 0.5$  grados en el rango de -10 a 85 grados Celsius. El sensor puede ser alimentado directamente desde el bus de datos, eliminando el uso de una fuente externa.



Figura 50: Sensor de temperatura DS18B20 con protección para el agua.  
Recuperado de Sensor DS18B20 [Online] (20 de Mayo de 2011).

El diagrama de bloques de la figura 51 muestra el proceso de la obtención de datos del sensor de temperatura.

La figura 52 muestra el diagrama electrónico para conectar el sensor de temperatura a el  $\mu C$  Arduino.

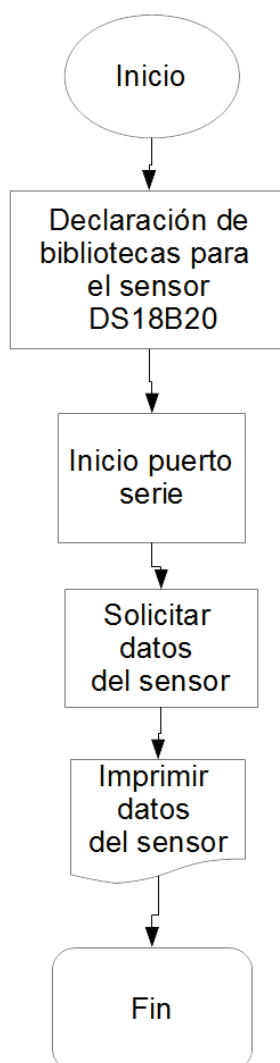


Figura 51: Diagrama de bloques del sensor de temperatura DS18B20.

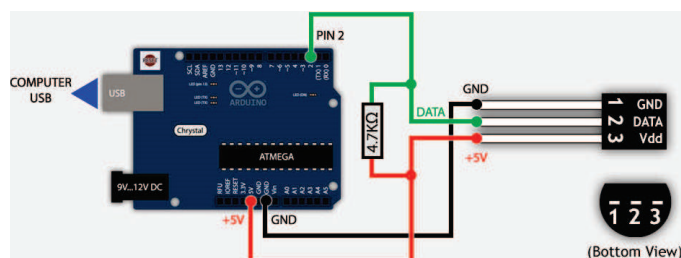


Figura 52: Diagrama electrónico utilizando Arduino y sensor de temperatura DS18B20.  
 . Recuperado de Medición de temperatura con Arduino Ethernet [Online] (20 de Mayo de 2011)

La programación del dispositivo se encuentra en el apartado A.0.3.

### III.5 Uso de teclado y EEPROM

Debido a la necesidad del medio de cultivo y los cambios que sufre por etapa, el usuario debe ajustar los valores necesarios para el envío de alarmas SMS, correspondiente a cada variable.

Esto se logra mediante la programación del  $\mu C$  para el uso de un teclado matricial, y el manejo de la memoria EEPROM, la cual se utiliza para el guardado de datos, mediante los siguientes pasos:

- Se asignan los valores a cada tecla del teclado matricial.
- Se realiza una rutina donde se guardan los valores de cada tecla en la memoria EEPROM.
- Se realiza una rutina para observar cual es el valor de la tecla que se está utilizando, por parte del usuario, para ser desplegado en la pantalla LCD.
- Se reservan localidades de memoria de la EEPROM, que son utilizadas cada vez que el usuario desee agregar un nuevo valor para la activación de las alarmas.
- Los valores guardados en la EEPROM son utilizados automáticamente por el programa, verificando los ajustes realizados por el usuario, para activar o no el uso de las alarmas.

En la figura 53 se muestra una interconexión entre el  $\mu C$  Arduino, una pantalla LCD y el teclado matricial, donde los caracteres del teclado y la información necesaria sera desplegada en la pantalla LCD.

Finalmente en las figuras 54, 55, 56 57, 58, 59 se muestra el uso de la pantalla LCD y el teclado para ajustar los datos de activación de la alarma SMS.

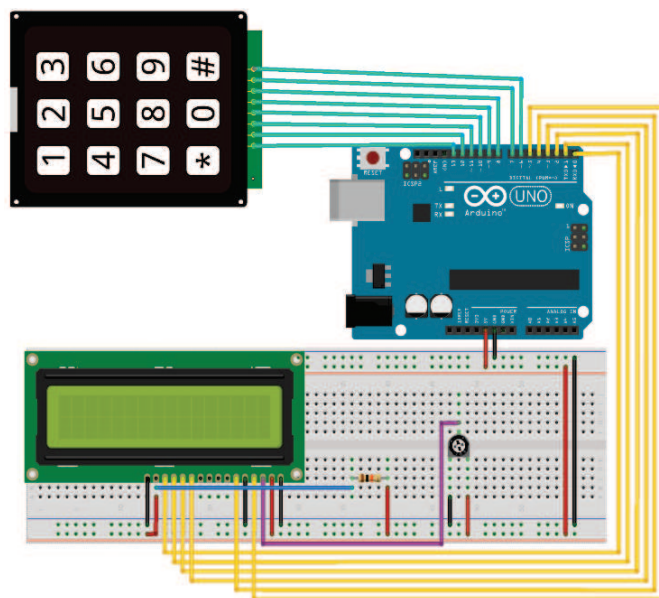
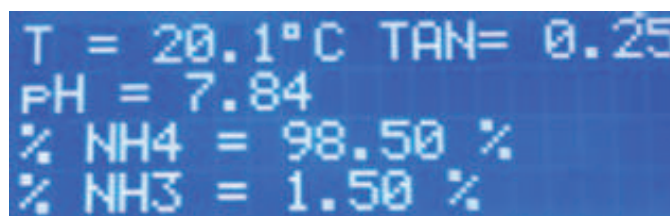


Figura 53: Diagrama electrónico utilizando el Arduino, teclado y LCD.  
Recuperado de Calculadora Arduino [Online] (20 de Mayo de 2011).

```
PHmin = 7.50  
PHmax = 8.20  
% NH3 min = 0.00%  
% NH3 max = 30.00%
```

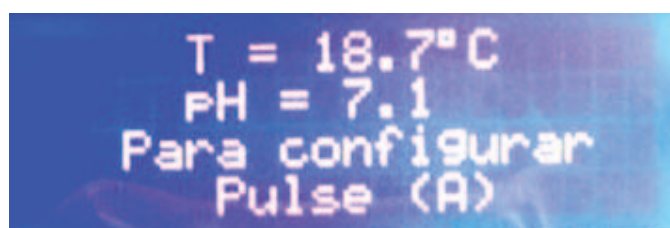
Figura 54: Inicio de menú con variables registradas en EEPROM.

La figura 54 presenta los valores mínimos y máximos asignados a cada variable para la activación de la alarma SMS, estos valores están guardados en la memoria EEPROM del  $\mu C$  y son actualizados dependiendo del usuario.



T = 20.1°C TAN= 0.25  
pH = 7.84  
% NH4 = 98.50 %  
% NH3 = 1.50 %

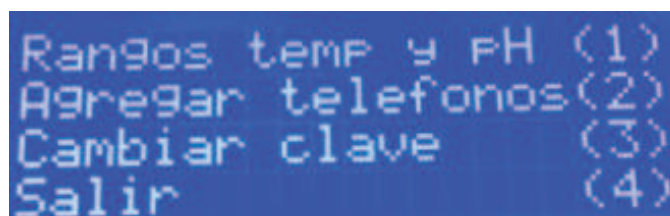
Figura 55: Segunda etapa de menú con variables registradas en EEPROM.



T = 18.7°C  
pH = 7.1  
Para configurar  
Pulse (A)

Figura 56: LCD desplegando el valor de la medición continua.

Las figuras 55 y 56 ilustran diferentes maneras de presentar la información obtenida en tiempo real de los sensores.



Rangos temp y pH (1)  
Agregar telefonos(2)  
Cambiar clave (3)  
Salir (4)

Figura 57: Menú para ajuste para alarma SMS con intervalo máximo y mínimo.

En la figura 57 se muestra la manera de cambiar los parámetros guardados en la EEPROM, para la alarma SMS, el número al que será enviado y el cambio de clave, dependiendo del usuario.

Por último, en las figuras 58 y 59 se muestra el ajuste de la variable pH del sistema diseñado.



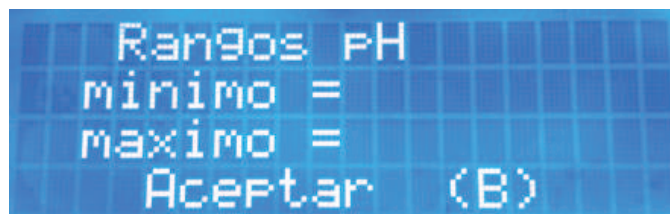


Figura 58: LCD en espera de ingresar datos máximo y mínimo para pH.

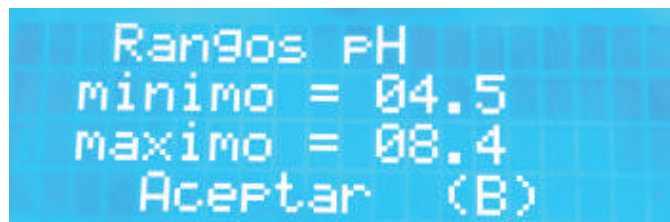


Figura 59: Nuevos intervalos establecidos para activación de alarma vía SMS.

### III.6 Integración del sistema electrónico desarrollada

El sistema electrónico diseñado esta compuesto por los módulos, ilustradas en la figura 60:

En la figura 60 se muestra una interconexión existente en el sistema diseñado, el diagrama de bloques contiene un módulo haciendo referencia a los sensores utilizados, su etapa de acondicionamiento de señal, una pantalla LCD y el teclado matricial, además de la comunicación inalámbrica, algunos bloques tienen comunicación de 2 vías, para tener un control sobre la información enviada y recibida de los sensores y de la comunicación inalámbrica hacia el  $\mu C$ .

En la figura 61 se muestra el diagrama de bloques del sistema diseñado en este trabajo de tesis, el cual contiene 2 etapas de consulta para enviar los datos inalámbricamente y la activación de la alarma, además del despliegue de datos en la pantalla LCD, el cual es actualizado de manera constante.

Algunos sistemas realizados con el mismo fin, han sido reportados en Neelamegam

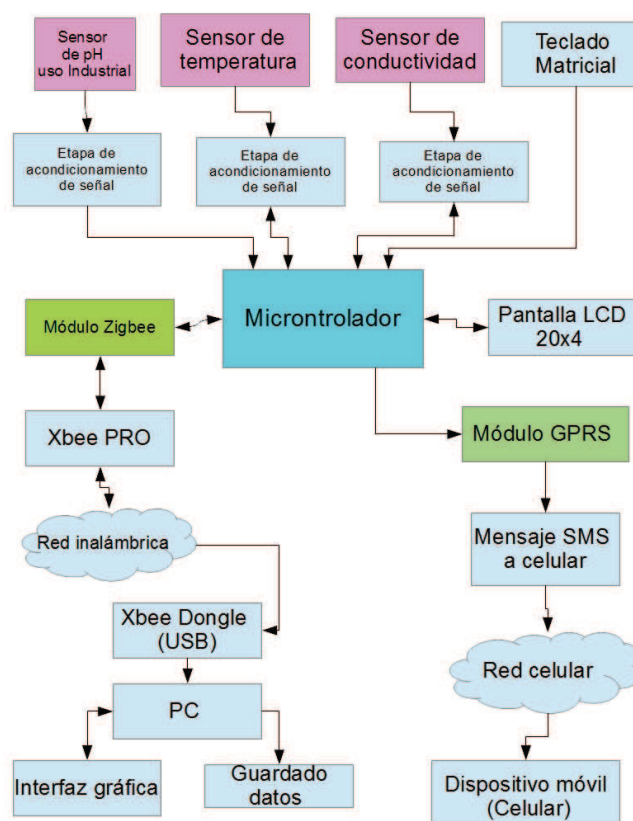


Figura 60: Diagrama de bloques con los principales módulos del sistema diseñado en este trabajo de tesis.

*et al.* (2008), Wu *et al.* (2010) y Bückle *et al.* (2003).

## III.7 Conclusiones

Los sensores ISE presentan diferentes características en voltaje, amperaje, impedancia, por lo cual es necesario conocer a fondo sus interacciones con el medio, para realizar una adecuada acondicionamiento de señal mediante circuitos analógicos. Los circuitos digitales permiten una protección contra el ruido eléctrico, pero requieren de mayor programación en el  $\mu C$ . Ambos son necesarios para la eficacia de la medición. Finalmente dicha información es procesada y visualizada por el usuario mediante la pantalla LCD y el uso de un teclado para su manipulación. Es importante el uso de módulos de

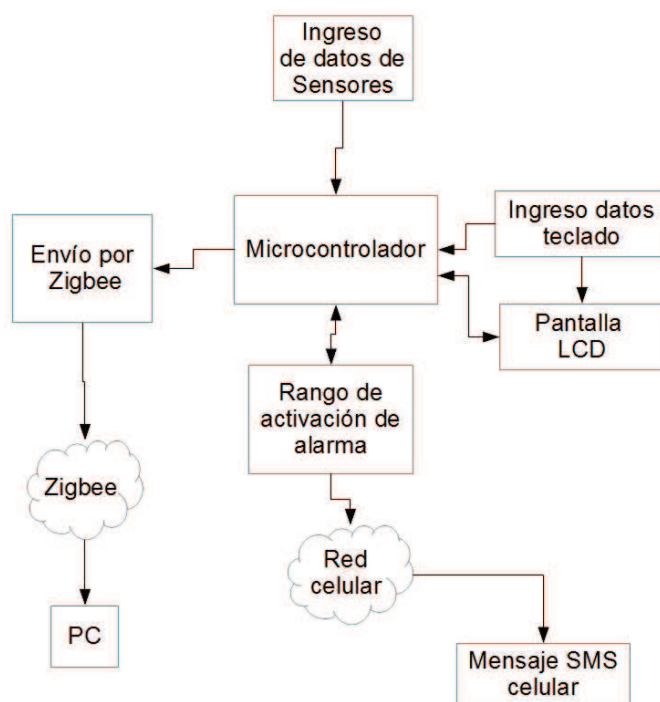


Figura 61: Diagrama de bloques con las principales tareas que realiza el sistema diseñado en este trabajo de tesis.

comunicación inalámbrica, tales como RF, Xbee, Bluetooth, GPRS, para aprovechar las redes de comunicación actuales.

# Capítulo IV

## Envío de datos por comunicación inalámbrica

En esta sección se describe los 2 módulos utilizados para diferentes  $\mu C$  para la comunicación inalámbrica. En este trabajo de tesis son utilizados los módulos Zigbee y GSM/GPRS con la plataforma Arduino, los cuales permiten conectar el dispositivo de comunicación inalámbrica y el dispositivo para el envío de mensajes SMS.

### IV.0.1 Dispositivo con comunicación Zigbee

El protocolo Zigbee es utilizado por el dispositivo Xbee, el cual permite comunicar al Arduino inalámbricamente usando la red Zigbee a diferentes sistemas. El dispositivo permite la comunicación hasta 100 pies en un área cerrada, o 300 pies en línea de vista. Este dispositivo permite la comunicación Serial/USB o puede ser utilizado por los métodos API o comandos simples, los cuales se utilizan para la configuración punto a punto o creación de redes entre los mismos dispositivos.

El dispositivo contiene una base, a la cual se adapta el circuito Xbee, dependiendo de la versión del fabricante, el dispositivo contiene una serie de pines los cuales configuran los pines utilizados en el Arduino para la comunicación con el dispositivo Xbee o con la programación del Arduino. El dispositivo utilizado en este trabajo de tesis es el **Xbee shield**, de la compañía Sainsmart.

El dispositivo contiene 2 jumpers, los cuales están colocados en 2 de 3 pines, con la leyenda **Xbee/USB**, dependiendo donde se encuentre conectado los jumpers, ocurre lo siguiente:

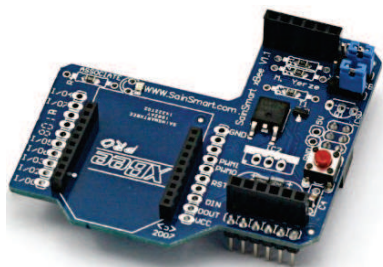


Figura 62: Xbee shield.

Recuperado de Catálogo de productos Sainsmart [Online] (20 de Mayo de 2011).

- Si los jumpers están en modo Xbee, el pin **DOUT** del Xbee está conectado al pin **RX** del microcontrolador, y el pin **DIN** esta al pin **TX**, lo cual permite la comunicación del microcontrolador al Xbee y viceversa.
- Si los jumpers estan en modo USB, el pin **DOUT** del Xbee esta conectado al pin **RX** del chip FTDI, y el pin **DIN** esta al pin **TX** del FTDI, lo cual permite la comunicación del microcontrolador a la computadora, lo cual inhabilita la comunicación del Xbee al microcontrolador.

### Configuración básica

Una manera para configurar los parámetros del dispositivo Xbee, punto a punto, es necesario los siguientes pasos:

1. Abrir el programa XCTU para configuración rápida del dispositivo.
2. Definir el identificador (ID) y el canal de la red utilizada por los Xbee, debe ser el mismo para ambos Xbee.
3. Configurar un Xbee como coordinador y el otro Xbee como esclavo.
4. Definir el valor DH del maestro en valor 0.
5. Establecer el valor DL del esclavo, el cual debe ir en el MY del esclavo.

6. Establecer el valor DH del esclavo en valor 0.
7. Definir el valor DL del esclavo, el cual debe ir en el MY del maestro.

De esta manera los dispositivos se encuentran comunicados uno a otro, por lo cual, al enviar la información del Arduino con el dispositivo maestro, será recibida en la PC por el dispositivo esclavo. La configuración de los módulos Xbee se realiza con el programa XCTU, citado en Faludi (2010).

### IV.0.2 Xbee utilizado

El circuito de la figura 63, es un chip Xbee, el cual es una solución integrada que brinda un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos. Estos circuitos utilizan el protocolo de red IEEE 802.15.4 para crear redes punto a multipunto, o para redes punto a punto. Fueron diseñados para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible. Por lo que básicamente XBee es propiedad de Digi basado en el protocolo Zigbee.

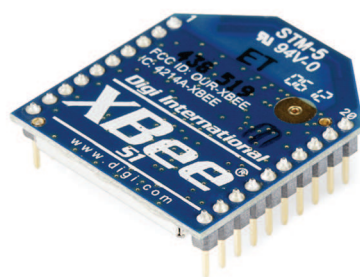


Figura 63: XBee 1mW con *Trace Antenna* - Series 1 (802.15.4).

Los circuitos Xbee cuentan con las siguientes características, mostradas en la tabla V.

En este trabajo de Tesis se utilizaron **2 módulos Xbee PRO S1**.

| Specification                                    | XBee                                                            | XBee-PRO                                                                                                                |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Performance</b>                               |                                                                 |                                                                                                                         |
| Indoor/Urban Range                               | Up to 100 ft (30 m)                                             | Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) International variant                                                         |
| Outdoor RF line-of-sight Range                   | Up to 300 ft (90 m)                                             | Up to 1 mile (1600 m), up to 2500 ft (750 m) international variant                                                      |
| Transmit Power Output (software selectable)      | 1mW (0 dBm)                                                     | 63mW (18dBm)*<br>10mW (10 dBm) for International variant                                                                |
| RF Data Rate                                     | 250,000 bps                                                     | 250,000 bps                                                                                                             |
| Serial Interface Data Rate (software selectable) | 1200 bps - 250 kbps<br>(non-standard baud rates also supported) | 1200 bps - 250 kbps<br>(non-standard baud rates also supported)                                                         |
| Receiver Sensitivity                             | -92 dBm (1% packet error rate)                                  | -100 dBm (1% packet error rate)                                                                                         |
| <b>Power Requirements</b>                        |                                                                 |                                                                                                                         |
| Supply Voltage                                   | 2.8 – 3.4 V                                                     | 2.8 – 3.4 V                                                                                                             |
| Transmit Current (typical)                       | 45mA (@ 3.3 V)                                                  | 250mA (@3.3 V) (150mA for international variant)<br>RPSMA module only: 340mA (@3.3 V) (180mA for international variant) |
| Idle / Receive Current (typical)                 | 50mA (@ 3.3 V)                                                  | 55mA (@ 3.3 V)                                                                                                          |
| Power-down Current                               | < 10 $\mu$ A                                                    | < 10 $\mu$ A                                                                                                            |
| <b>General</b>                                   |                                                                 |                                                                                                                         |
| Operating Frequency                              | ISM 2.4 GHz                                                     | ISM 2.4 GHz                                                                                                             |
| Dimensions                                       | 0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)                             | 0.960" x 1.297" (2.438cm x 3.294cm)                                                                                     |
| Operating Temperature                            | -40 to 85° C (industrial)                                       | -40 to 85° C (industrial)                                                                                               |
| Antenna Options                                  | Integrated Whip, Chip or U.FL Connector, RPSMA Connector        | Integrated Whip, Chip or U.FL Connector, RPSMA Connector                                                                |

Tabla V: Propiedades de los modelos Xbee y Xbee Pro.  
Recuperado de Hoja de datos módulo Xbee [Online] (20 de Mayo de 2011).

### IV.0.3 Módulo GSM-GPRS

El módulo GSM (Sistema global para las comunicaciones móviles) permite conectar al Arduino con el internet usando la comunicación GPRS (servicio general de paquetes vía radio). Dicho módulo requiere una tarjeta SIM (módulo de identificación de abonado) con cobertura GPRS, y realizar el envío de los comandos necesarios para el envío de llamadas o mensajes SMS. La biblioteca **GSM** contiene comandos para el envío y recepción de datos.

El módulo contiene un dispositivo, el cual es un radio SIM 900, el cual funciona en las frecuencias 850MHz, 900MHz, 1800MHz y 1900MHz. La máxima velocidad de envío y descarga de datos es de 85.6 Kbps.

Para el correcto funcionamiento del módulo, es necesario utilizar una fuente entre 700mA y 1A, **por lo que alimentar el Arduino mediante el puerto USB de la PC no es recomendado**, porque provoca errores por falta de energía eléctrica. El modem puede requerir hasta 2A durante la transmisión de datos.

Los caracteres para insertar los números telefónicos a donde se envían los mensajes, son programados por el usuario mediante el teclado matricial y la EEPROM, desplegados en el LCD del instrumento.

El modelo utilizado en este trabajo de tesis, marca Seedstudio modelo GPRS Shield V2.0, se muestra en la figura 64:



Figura 64: Módulo GSM shield.  
Recuperado de GSM Shield [Online] (20 de Mayo de 2011).



## IV.1 Implementación de la comunicación inalámbrica con dispositivo Xbee shield

Al utilizar el dispositivo Xbee shield, es necesario configurar ambos dispositivos, uno como coordinador y otro esclavo, con la finalidad de establecer la comunicación entre ambos dispositivos.

El diagrama de la figura 65 muestra la comunicación implementada:

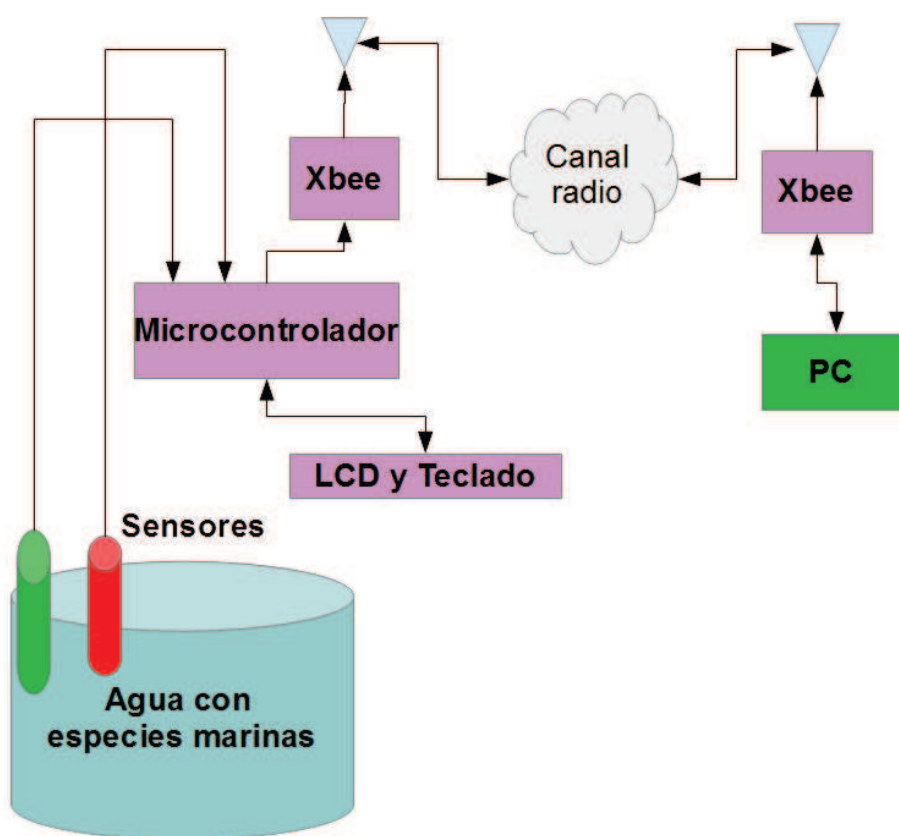


Figura 65: Diagrama general utilizando el módulo Xbee.

La figura contiene lo siguiente:

- Los sensores utilizados, que son el pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad.

- El medio a medir, que es agua de mar con especies marinas.
- El  $\mu C$  utilizado, el ARDUINO MEGA, como parte central del dispositivo
- Un teclado matricial 4x4 y pantalla LCD de 20x4.
- El circuito Xbee PRO S1, el cual se encarga de enviar la información al módulo Xbee PRO S1 esclavo.
- El circuito Xbee PRO S1, el cual se encarga de recibir la información y desplegarla en la PC.

## IV.2 Módulo GSM-GPRS para envío de alarma SMS

Al utilizar el sistema GSM, se programa mediante los comandos descritos en la biblioteca del módulo GSM Version 2.

Dado que la medición es comparada en cada momento por el sistema electrónico, se describen los siguientes casos:

- Si los valores medidos de las variables, no sobrepasan los rangos mínimo y máximo programado por el usuario, entonces el sistema sigue realizando la medición normalmente.
- Si el sistema detecta que un valor medido sobrepasa un intervalo determinado (mayor o menor que), el sistema recurre al envío de una alarma SMS (Donde el número fue programado previamente en el  $\mu C$  o es sobre-escrito utilizando el teclado matricial y la memoria EEPROM). Posterior al envío de la alarma SMS, el sistema vuelve a realizar las mediciones correspondiente y vuelve a comparar el valor medido respecto al intervalo determinado

El diagrama de la figura 66 siguiente se muestra la comunicación celular implementada, en esta figura contiene lo siguiente:

- Los sensores utilizados, que son pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto.
- El medio a medir, que es agua de mar con especies marinas.
- El  $\mu$ C utilizado, el ARDUINO MEGA 2560, como parte central del dispositivo
- Incluye un teclado 4x4 y pantalla LCD 20x4 (Con esto, se programa los valores máximo y mínimo para la activación de la alarma de una variable).
- El módulo GSM-GPRS en el Arduino, (Se encarga de enviar el mensaje SMS una vez activada la alarma).
- El SIM(Módulo de Identificación del Suscriptor) del celular se encarga de recibir el mensaje enviado por el Arduino.

Un ejemplo en el envío de la temperatura y el oxígeno disuelto medido, se presenta en el apéndice A.0.4

### IV.3 Interfaz gráfica con el usuario

El desarrollo de la interfaz gráfica fue realizada en programa Labview, de manera similar presentada por Kim *et al.* (2007), como se ilustra en la figura 67, dicha interfaz realiza lo siguiente:

- Despliega las variaciones de las mediciones respecto al tiempo.
- Configura los datos para la conexión con el módulo Zigbee.
- Muestra los datos mediante una variable numérica.

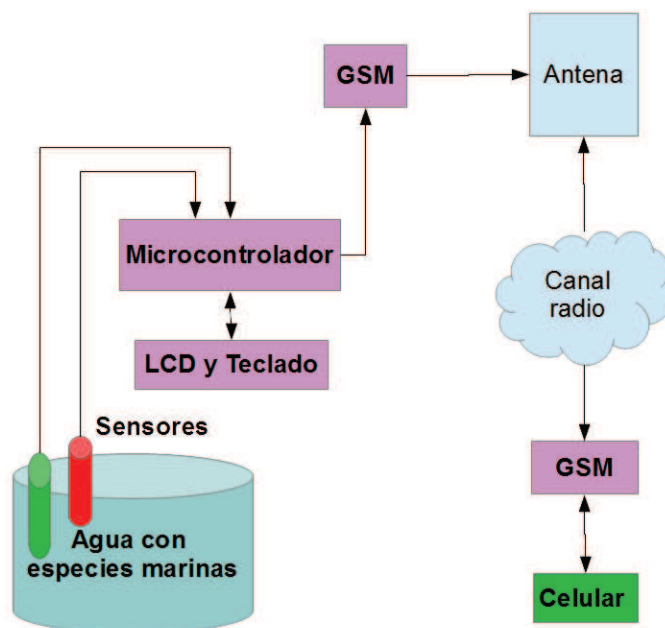


Figura 66: Diagrama general utilizando el módulo GSM.

- Contiene un offset numérico, para delimitar que datos se desea en cada pantalla.
- Guarda la información en un archivo de texto, para ser procesada posteriormente.

Este módulo se conecta a cualquier dispositivo con comunicación serial, ya sea un dongle Xbee o un Arduino con el módulo Zigbee, para procesamiento de datos.

El diagrama de bloques Labview de la interfaz gráfica es la figura 68.

Dicho módulo está integrado por las siguientes figuras 69, 70, 71 y 72, las cuales se encargan de procesar la información recibida por el módulo Zigbee.

La figura 69 se encarga de la configuración del puerto COM.

En la figura 70 se encarga de la lectura de datos por el puerto serie, para ser procesada por Labview.

En la figura 71 se muestra la conversión de cada caracter obtenido por el puerto serie, para ser procesado como un valor numérico y ser representado en las pantallas de la interfaz gráfica, este proceso es para cada una de las variables.

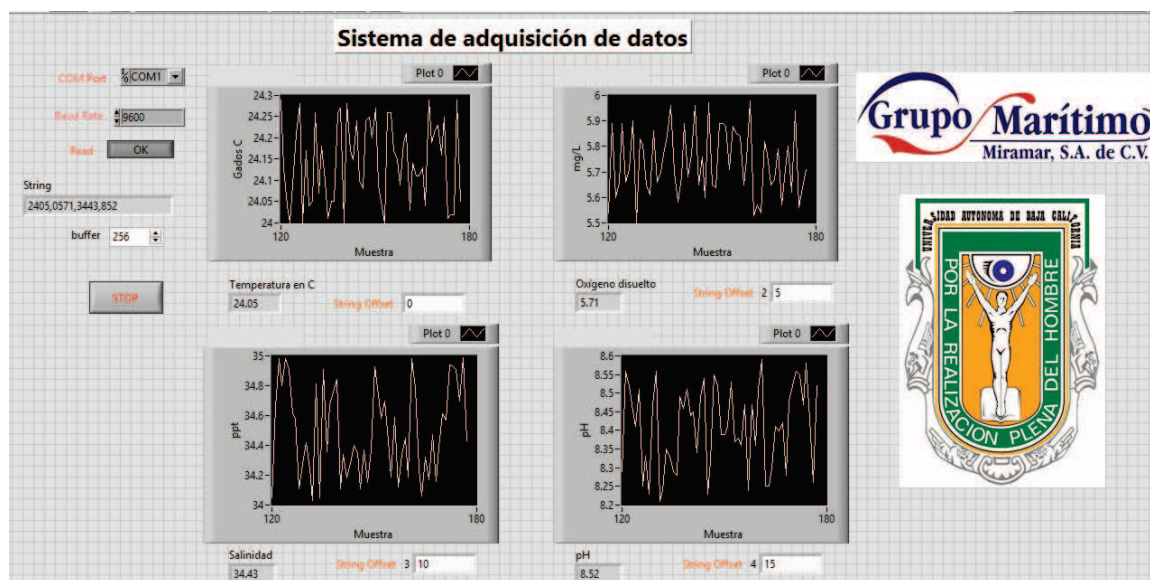


Figura 67: Interfaz gráfica desarrollada para la empresa Grupo Marítimo.

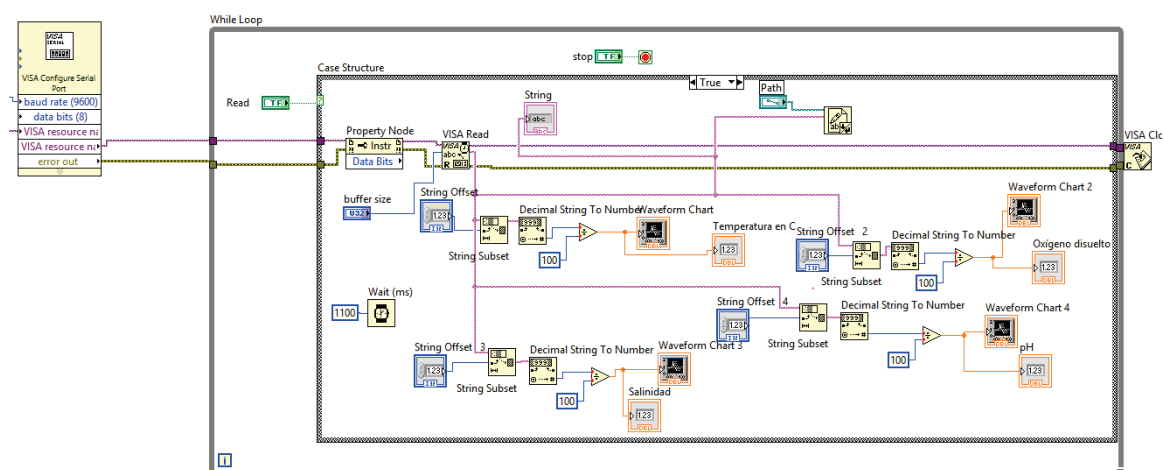


Figura 68: Diagrama de bloques de interfaz gráfica desarrollada en Labview.

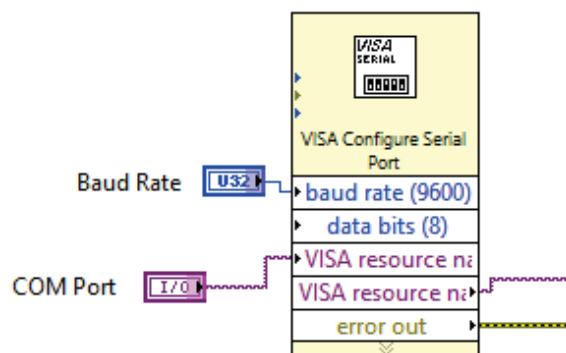


Figura 69: Configuración del puerto COM.

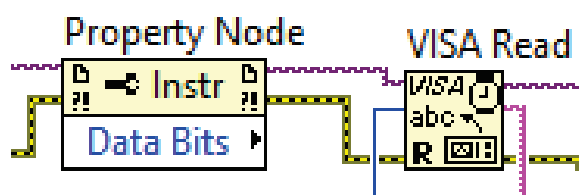


Figura 70: Lectura de datos por el puerto serie.

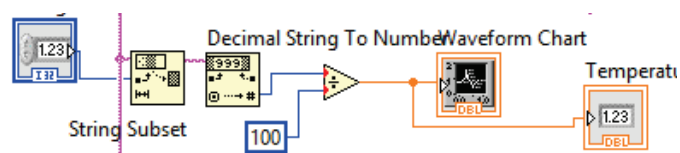


Figura 71: Conversión de cadena de caracteres a formato numérico

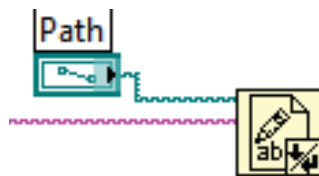


Figura 72: Etapa para guardar datos en archivo de texto.

En la figura 72 se muestra la configuración para el guardado de los datos obtenidos por el puerto serie, en un archivo de texto previamente creado.

## IV.4 Conclusiones

La comunicación inalámbrica es muy útil en ambientes donde el medio a sensar y el lugar de procesamiento de la información no se encuentran cercanos, por lo que el uso de tecnologías basadas en Zigbee y GSM-GPRS permiten el acceso a la información de una manera eficiente. La información es procesada por programas GUI (Interfaz gráfica de usuario), un ejemplo es en Labview, el cual permite obtener la información de un módulo serie, en este caso Xbee y desplegarla en una PC y guardar la información para ser procesada posteriormente.

# Capítulo V

## Resultados

### V.1 Diseño de carcasa hermética

Para resguardar el sistema electrónico desarrollado, se realizaron diferentes diseños de carcasas de resguardo, estos fueron hechos con el programa SolidWorks 2011.

#### V.1.1 Carcasa de sistema embebido desarrollado

El diseño de la carcasa se muestra en la figura 73 y sus medidas en la figura 74, fue realizada como sistema prototipo para cubrir las siguientes especificaciones:

- Protección del circuito contra humedad, polvo y cambios de temperatura.
- Acomodo ergonómico para el usuario, para la lectura de la pantalla LCD y el uso de teclado.
- Espacio suficiente para el  $\mu C$ , los módulos Zigbee y GSM-GPRS, y la etapa de acondicionamiento de señal.
- Imagen estética.

Además se realizó el diseño de una carcasa para el sistema Xbee dongle para la PC, como se ilustra en las figura 75 y 76, la cual fue utilizada para proteger el módulo Xbee con las mismas características de la figura 73.



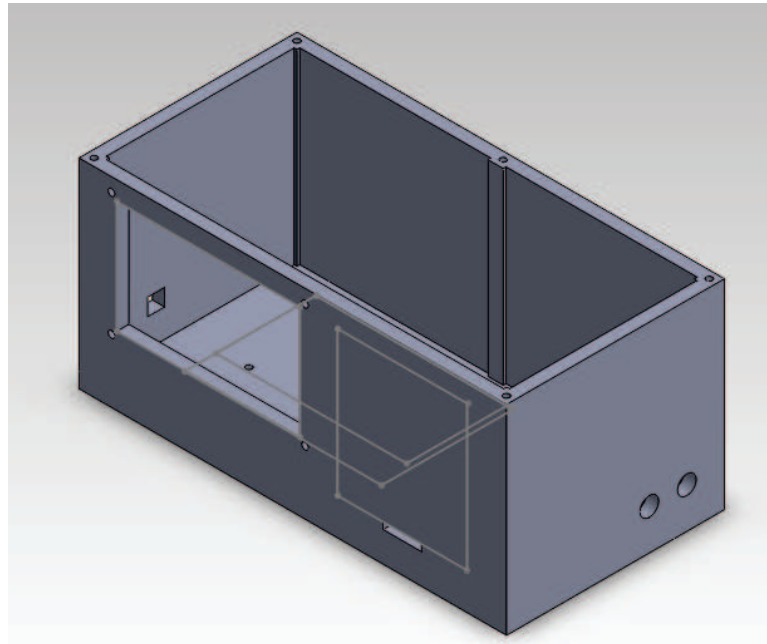


Figura 73: Diseño de carcasa hermética para sistema propuesta.

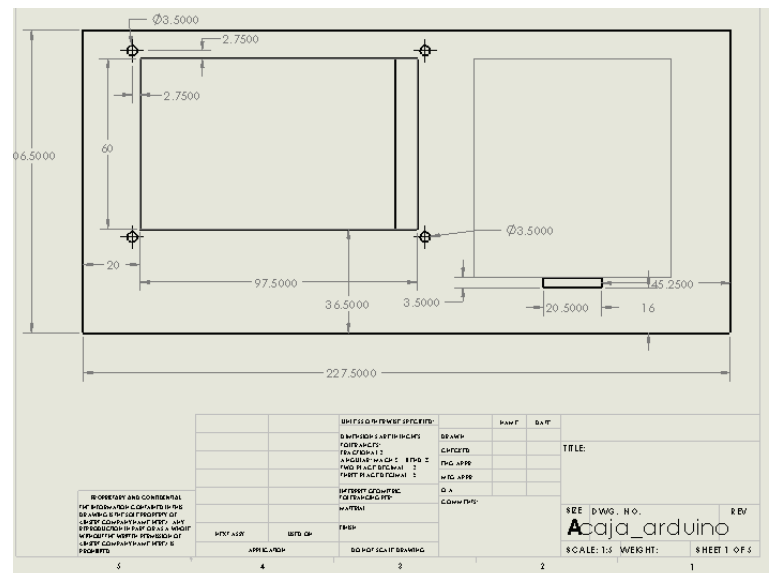


Figura 74: Medidas en mm de la carcasa hermética para sistema realizado.

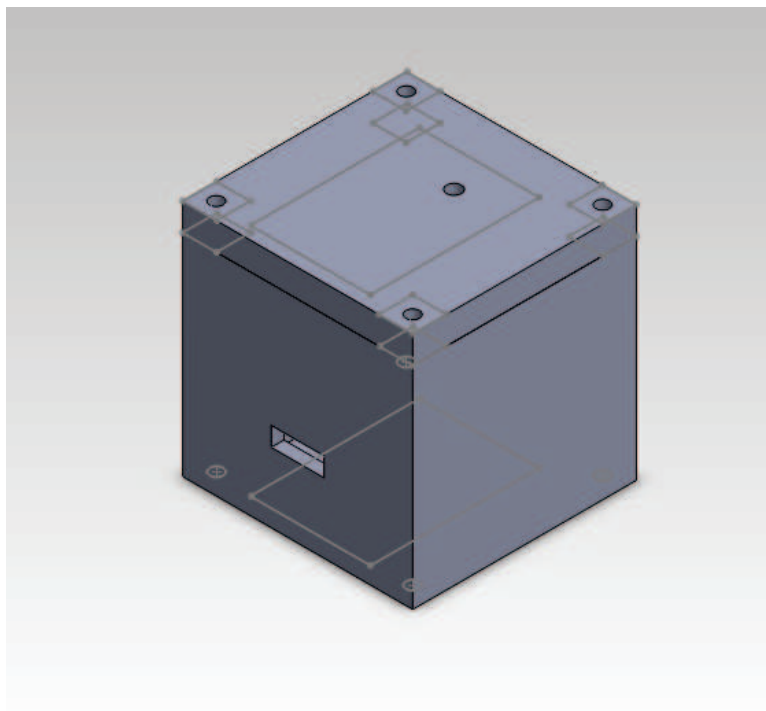


Figura 75: Diseño de la carcasa hermética para el Xbee de la PC.

## V.2 Versiones del sistema electrónico desarrollado

### V.2.1 Primer prototipo en protoboard y pruebas de laboratorio

El primer sistema electrónico fue desarrollado experimentalmente para pruebas en protoboard, realizando los circuitos necesarios, como se muestra en las figura 77, 78.

En el prototipo de la figura 77 se verificó el uso del AD620 para la medición del sensor de oxígeno disuelto, junto con la pantalla LCD y la comunicación Xbee.

Después de la verificación de cada medición de los sensores y la comunicación establecida, se probó el sistema electrónico en laboratorio, para verificar fallas por tiempo de uso, sobrecalentamiento, pérdida de datos por envío inalámbrico, etc, que puede observarse en la figura 79, el cual es el primer prototipo ensamblado en una carcasa genérica.

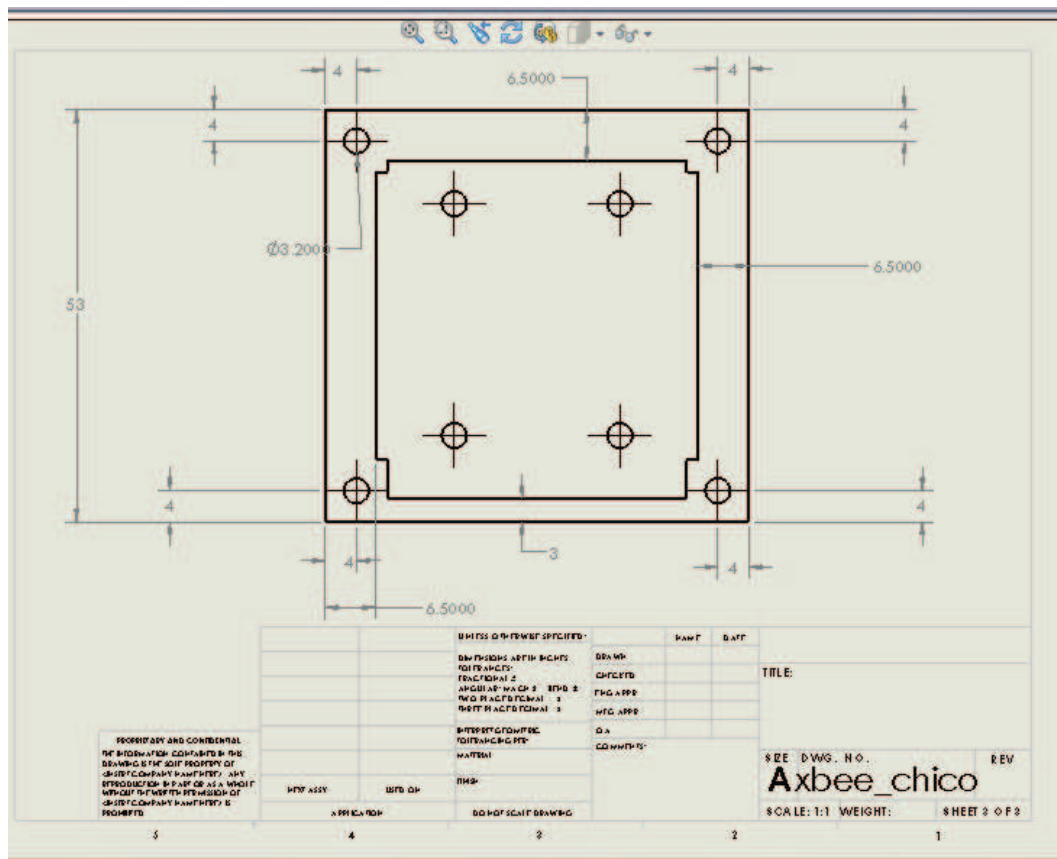


Figura 76: Medidas en mm de la carcasa hermética para el Xbee de la PC.



Figura 77: Prototipo en protoboard.

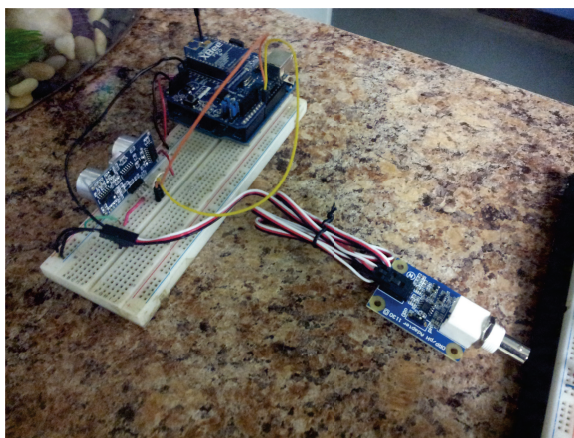


Figura 78: Pruebas de laboratorio.



Figura 79: Primer prototipo ensamblado en una carcasa genérica.

### V.2.2 Pruebas experimentales en UBP e IIO UABC

El primer prototipo fue probado en el laboratorio de la Unidad de Biotecnología en Piscicultura, donde se realizaron las mediciones de temperatura y oxígeno para el cultivo de la *Totoaba macdonaldi*, además en el laboratorio del Instituto de Investigaciones Oceanológicas, para el cultivo de *Almeja generosa*.



Figura 80: Pruebas experimentales del circuito con fuente de voltaje positiva y negativa.

En la figura 80 y 81 se realizó la medición de la temperatura y oxígeno disuelto, utilizando una fuente dual, posteriormente se utilizó una tierra virtual para la adecuación del AD623.



Figura 81: Sensores de oxígeno disuelto probados en cultivo de *Totoaba*.



Figura 82: Primer prototipo en funcionamiento con cultivo de Totoaba.

En la figura 82, se muestra el primer prototipo realizado, con base en el diseño de la figura 73.

### V.2.3 Pruebas experimentales en empresa Oceánica y Grupo Miramar

#### Pruebas de sistemas desarrollados en empresa comercial

En esta etapa experimental fueron diseñados 2 sistemas, que fueron implementados de igual manera en una carcasa hermética, la cual fue necesaria debido al ambiente de humedad presente en el laboratorio de la empresa Oceánica, este sistema se muestra en las figuras 83 y 84



Figura 83: Segundo prototipo de medición de pH y temperatura, para cultivo de almeja Generosa.

El sistema de la figura 83, se encuentra en una carcasa de la compañía ABB con protección IP65, necesaria para el ambiente donde se encuentra el instrumento, se encarga de la medición de pH, amoníaco y temperatura, además cuenta con el sistema GSM para el envío de alarmas SMS ante variaciones de pH y temperatura.



Figura 84: Tercer prototipo utilizado de medición de pH y temperatura, para medición de tanque principal de bombeo de agua.

En la figura 84 se muestra un sistema que realizó la medición de pH y temperatura, instalado en el tanque principal de bombeo de agua tratada para el cultivo de Almeja generosa, incluye comunicación Zigbee y GSM.

#### **V.2.4 Pruebas de campo con el cuarto prototipo de uso comercial**

El sistema de la figura 85 se encargó de la medición de pH y temperatura, colocado en un estanque de limpieza y traslado de Langosta Roja. Este sistema solamente cuenta con la medición de las variables, sin comunicación inalámbrica, debido a que solo se necesitó verificar la medición in-situ por parte de los técnicos encargados del laboratorio.

Finalmente se desarrolló un cuarto sistema, como se muestra en la figura 86, para la medición de pH y NH<sub>3</sub> en una tina de cultivo de almeja generosa.





Figura 85: Cuarto prototipo de medición de pH y temperatura, para medición de cultivo de langosta roja.



Figura 86: Equipo de sensor de pH, temperatura y NH3 en medición de cultivo de almeja generosa.



### V.3 Comparación con sistemas comerciales

Para la realización de la comparación de las mediciones realizadas, se observó el método utilizado en la empresa, para hacer la comparación de la medición realizada por el técnico responsable y la medición realizada por el sistema desarrollado.

Actualmente en la la empresa Oceánica, para medir los valores de pH, recurren al uso de tiras colorimétricas, como se ilustra en la figura 87, además los registros de temperatura y pH son anotados en una libreta, los cuales se ilustran en la figura 88, para posteriormente ser procesados.



Figura 87: Medición de pH en la empresa Oceánica.

El instrumento utilizado en el laboratorio para medir oxígeno disuelto y temperatura es el YSI 55, que puede observarse en la figura 90:

El instrumento fue comparado con el instrumento desarrollado en este trabajo de tesis, los parámetros se describen en la tabla VI, el cual contiene el oxígeno disuelto y temperatura, la comparación fue realizada en los laboratorios de UBP UABC además del laboratorio IIO de UABC.

1/ octubre /14

| Sistema | °C   | pH  |  |
|---------|------|-----|--|
|         | 18.5 | 8.2 |  |

| SISTEMA | °C   | ALIMENTO  | OBS. |
|---------|------|-----------|------|
| 1. 4A   | 18.1 | Muy Claro |      |
| 2. 5A   | 18.0 | ✓         |      |
| 3. 6A   | 18.0 | ✓         |      |
| 4. 7A   | 18.1 | ✓         |      |
| 5. 8A   | 18.0 | ✓         |      |

\* ALIMENTACIÓN → 72 cubetas.

---

2/ octubre /14

| Sistema | °C   | pH  |  |
|---------|------|-----|--|
|         | 18.6 | 8.2 |  |

| SISTEMA | °C   | ALIMENTO  | OBS. |
|---------|------|-----------|------|
| 4A      | 17.9 | Muy Claro |      |
| 5A      | 18.1 | ✓         |      |
| 6A      | 18.1 | ✓         |      |
| 7A      | 18.1 | ✓         |      |
| 8A      | 18.1 | ✓         |      |

\* Seguimiento de todos los Sistemas.

Figura 88: Registro de temperatura y pH en la empresa Oceánica.

| Sensor           | Parámetro | YSI 55     | Sistema electrónico |
|------------------|-----------|------------|---------------------|
| Oxígeno disuelto | alcance   | 0-20 mg/L  | 0-20 mg/L           |
|                  | Exactitud | 0.3mg/L    | 0.5 mg/L            |
| Temperatura      | Alcance   | -5 a 45 oC | -55 a 125 oC        |
|                  | Exactitud | 0.2 oC     | 0.05 oC             |

Tabla VI: Comparación YSI 55 y sistema electrónico desarrollado.

**GRUPO MARÍTIMO MIRAMAR S.A. DE C.V.**  
Calle 10 #350 El Suroeste Esmeralda, B.C. 22760. Tels: (046) 175-4607, 175-7624 Fax: 175-9446  
R.F.C. GMM-100604-20

Centro de control: grupo@miramar.com

**PRODUCTO VIVO EN ALMACENAJE HUMÉDRO**  
**FORMATO DE PROCEDIMIENTO**

|                                 |                                  |                       |            |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------|
| Fecha de Emisión:<br>Enero 2014 | Clave del documento:<br>MPO001-0 | 0° Revisión o Edición | 2° Edición |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------|

Página 1

**FORMATO 14-b. CONTROL DE PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS EN AGUA POTABLE**

Número folio: **000493**  
FORMATO-20MP04

Mes: Noviembre Hoja: de

| Fecha    | Hora  | Punto de Muestreo | Cloro residual (ppm o mg/L) | pH  | Observaciones        | Acciones correctivas |
|----------|-------|-------------------|-----------------------------|-----|----------------------|----------------------|
| 26-11-14 | 08:30 | Cuatahuan         | 0                           | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 08:31 | Ensayague         | 0.2                         | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 08:32 | Ensayague         | 0                           | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 08:33 | Ensayague         | 0.2                         | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| 26-11-14 | 08:34 | Cuatahuan         | 0                           | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 08:35 | Cuatahuan         | 5.0                         | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 08:37 | Ensayague         | 5.0                         | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 08:40 | Cuatahuan         | 5.0                         | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| 26-11-14 | 15:30 | Cuatahuan         | 0                           | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 15:35 | Cuatahuan         | 1.5                         | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 15:38 | Ensayague         | 1.5                         | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 15:43 | Cuatahuan         | 0.6                         | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| 27-11-14 | 08:30 | Cuatahuan         | 0                           | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 08:31 | Cuatahuan         | 0.6                         | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 08:34 | Ensayague         | 1.0                         | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| "        | 08:45 | Cuatahuan         | 0.6                         | 7.8 | cloro fuerte de agua | res. cloro           |
| 27-11-14 |       |                   |                             |     |                      |                      |
| "        |       |                   |                             |     |                      |                      |
| "        |       |                   |                             |     |                      |                      |

Firmas requeridas:

Firma realizó: \_\_\_\_\_

Firma verificó: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Calle 10 #350 El Suroeste Esmeralda, B.C. 22760. Tels: (046) 175-4607, 175-7624 Fax: 175-9446  
R.F.C. GMM-100604-20

Figura 89: Registro de temperatura y pH en la empresa Grupo Miramar.



Figura 90: Sistema YSI 55 para oxígeno disuelto y temperatura.

| Sensor | Parámetro                | Jenco 5005 | Sistema electrónico |
|--------|--------------------------|------------|---------------------|
| pH     | Alcance                  | 0-14       | 0-14                |
| " "    | Precisión                | 0.01       | 0.03                |
| " "    | Resolución               | 0.01       | 0.01                |
| " "    | Tiempo de vida de sensor | 1 año      | 5 años              |
| " "    | Calibración              | Manual     | Automático          |
| " "    | Sensor Temperatura       | Opcional   | Integrado           |

Tabla VII: Comparación Jenco 5005 y sistema electrónico desarrollado.

En algunas ocasiones, en los laboratorios de la empresas utilizan instrumentos pH-metro comercial, uno de ellos es el instrumento JENCO 5005, el cual fue comparado con el sistema para medir pH, dicha comparación se muestra en la tabla VII.

En la figura 91 se puede observar un ejemplo de como el instrumento YSI 55 fue comparado respecto al instrumento realizado en este trabajo de tesis, el cual se puede apreciar como las mediciones son muy cercanas entre si, estas pruebas fueron realizadas durante 2 meses aproximadamente.



Figura 91: Comparación del sistema de oxígeno disuelto obtenido versus uno comercial.

De igual manera, se ilustra en la figura 92 la comparación de una medición del valor de pH con el instrumento JENCO 5005 y el instrumento desarrollado en este trabajo de tesis, el cual tiene un valor muy cercano al sistema comercial, dicho valor no puede ser comparado con las tiras colorimétricas, dado que solamente pueden detectar valores

enteros o discretos.



Figura 92: Comparación del sistema de pH obtenido versus uno comercial.

En la empresa Grupo Miramar también se cuenta con un sistema de medición de salinidad, el cual necesita de una muestra del medio para obtener la salinidad, dicho sistema no se programó para la activación de alarmas ni comunicación inalámbrica, el cual se ilustra en la figura 93. Por lo que el sistema electrónico desarrollado en este trabajo de tesis cumple con las especificaciones necesarias para ser un producto competitivo en el mercado, con la capacidad de ser adaptado a las necesidades del usuario.

### V.3.1 Resultados de medición de temperatura

El sistema desarrollado en este trabajo de tesis registró el valor de la temperatura, ubicado en el laboratorio UBP de UABC, en el periodo de un mes de prueba, se ilustran las gráficas de los datos obtenidos en las figuras 94 y 95, donde se obtiene las siguientes mediciones:

En la figura 94, se muestra la variación de temperatura en el estanque con la especie

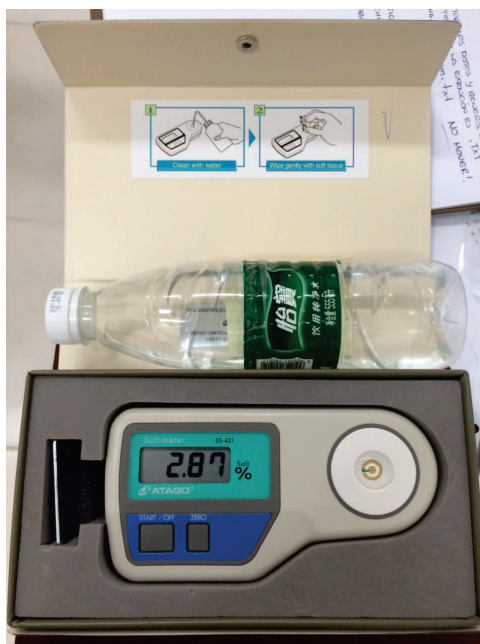


Figura 93: Instrumento de medición de salinidad en empresa Grupo Miramar.

Totoaba en etapa adulta, la cual tiene una variación entre 20 a 24 grados centígrados, esto sucede por los cambios ambientales de día y noche.

En la figura 95, se muestra la variación de temperatura en el estanque con la especie Totoaba en etapa juvenil, la cual tiene una variación entre 19.6 a 23 grados centígrados, similar a la etapa adulta, dicha temperatura se encuentra controlada mediante el intercambio de agua por placas térmicas.

### V.3.2 Resultados de la medición de Oxígeno

El sistema desarrollado en este trabajo de investigación registró el valor de temperatura, ubicado en el laboratorio UBP de UABC, en el periodo de un mes de prueba, se ilustran las gráficas de los datos obtenidos en las figuras 97 y 98, además se muestra en la figura 96 el cambio que experimenta el agua después de haber pasado un día de alimento y no haber realizado la limpieza adecuada en el estanque de cultivo.

En la figura 97, se muestra la variación de oxígeno en el estanque con la especie



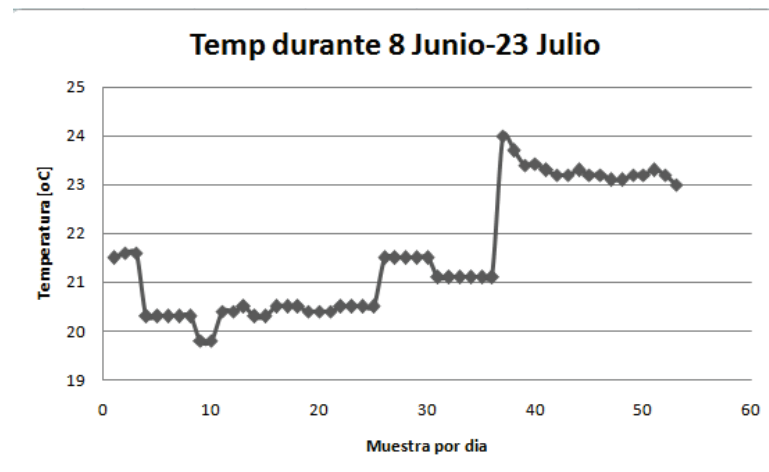


Figura 94: Medición de temperatura obtenida en estanque de Totoaba en etapa adulta en laboratorio de UBP.

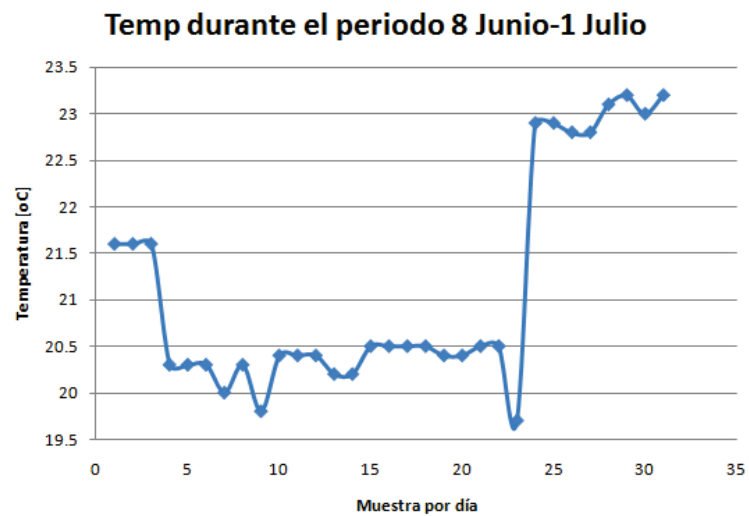


Figura 95: Medición de temperatura obtenida en estanque de totoaba en etapa juvenil en laboratorio de UBP.

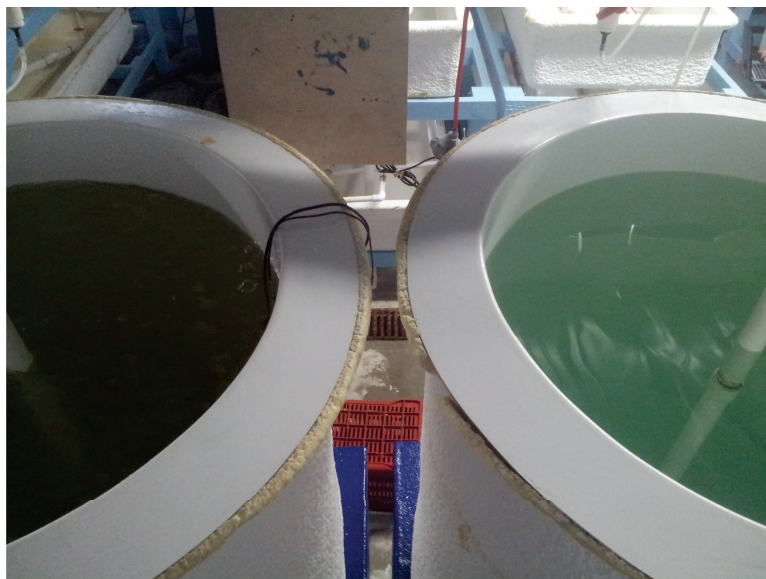


Figura 96: Cambio de color y propiedades del agua, al haberse dado el proceso de alimento y desechos naturales de la semilla de almeja generosa.

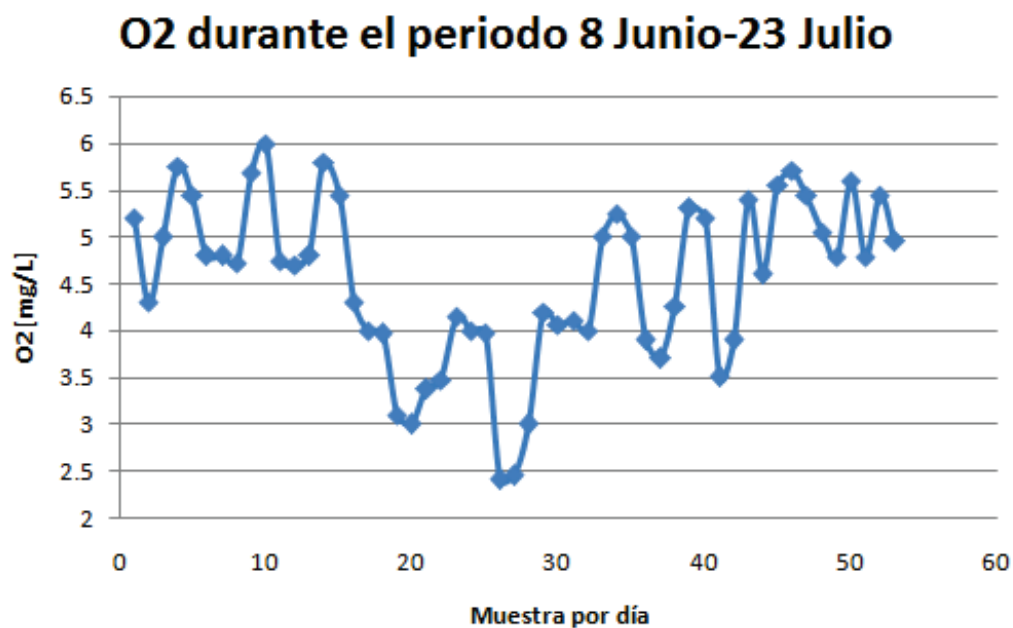


Figura 97: Medición de oxígeno disuelto obtenido en estanque de totoaba en etapa adulta en laboratorio de UBP.



Totoaba en etapa adulta, la cual tiene una variación entre 6 y 2.5 mg/L, se toma en cuenta que se obtuvo una lectura de 2.5 mg/L, lo cual presenta un riesgo al cultivo, dado que el investigador responsable del laboratorio comentó que el valor mínimo para evitar riesgos son 3 mg/L.

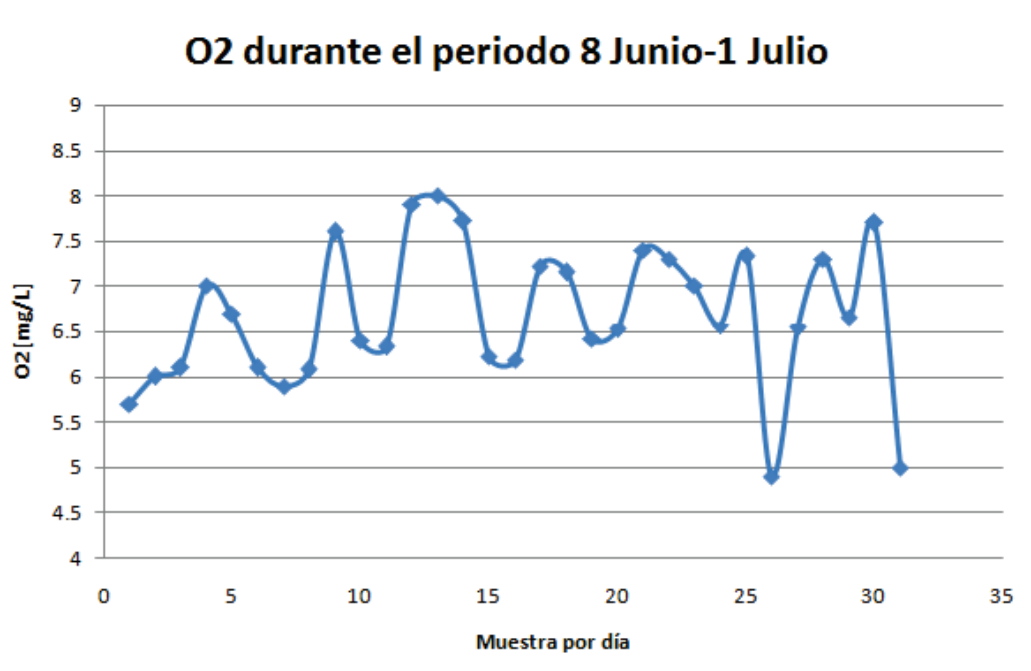


Figura 98: Medición de oxígeno disuelto obtenido en estanque de totoaba etapa juvenil en laboratorio del UBP

En la figura 98, se muestra la variación de oxígeno en el estanque con la especie Totoaba en etapa juvenil, la cual tiene una variación entre 8 y 5 mg/L, esto sucede por los cambios ambientales de día y noche.

### V.3.3 Resultados de la medición de pH

El sistema que contiene el sensor de pH, temperatura y amoníaco, fue utilizado tanto en la empresa Oceánica y Grupo Miramar, obteniendo los siguientes resultados:

En la figura 99, se muestra la variación de pH en el estanque con cultivo de almeja generosa, la cual tiene una concentración de valores entre 7.8 a 8.5 mg/L, se tiene un

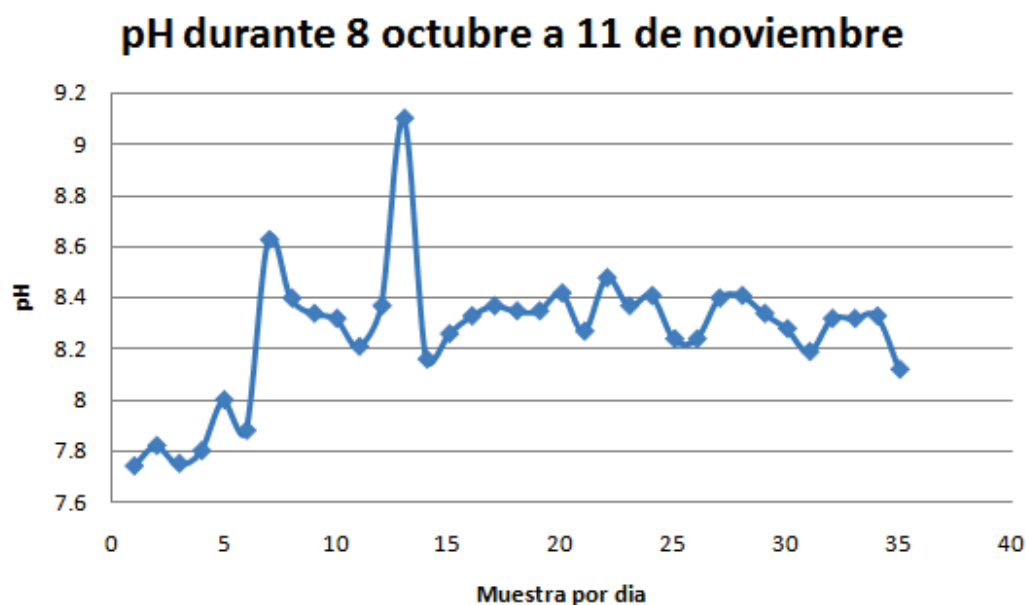


Figura 99: Medición de pH obtenido en estanque # 1 en cultivo de almeja generosa.

valor de 9 de pH, debido a que se realizó una limpieza ese día en ese estanque.

En la figura 100, se muestra la variación de pH en el estanque con cultivo de almeja generosa, la cual tiene una concentración de valores entre 8 a 8.4 mg/L, normalmente el cultivo debe de estar entre 8.2 a 8.5 de pH, para la formación óptima de la concha de dicha especie, además se obtuvo el valor de la temperatura para correcciones en el valor de pH.

En la figura 101, se muestra la variación de temperatura en el estanque con cultivo de almeja generosa, la cual tiene una concentración de valores entre 16.7 a 18.7 grados centígrados.

En la figura 102, se muestra la variación de temperatura en el estanque # 2 con cultivo de almeja generosa, la cual tiene una concentración de valores entre 17.5 a 18.5 grados centígrados, similar a la temperatura de los tanques presentes en la empresa, además se nota un valor de 21 grados, debido a que se realizó mantenimiento dicho día y el sensor estuvo expuesto a temperatura ambiente.

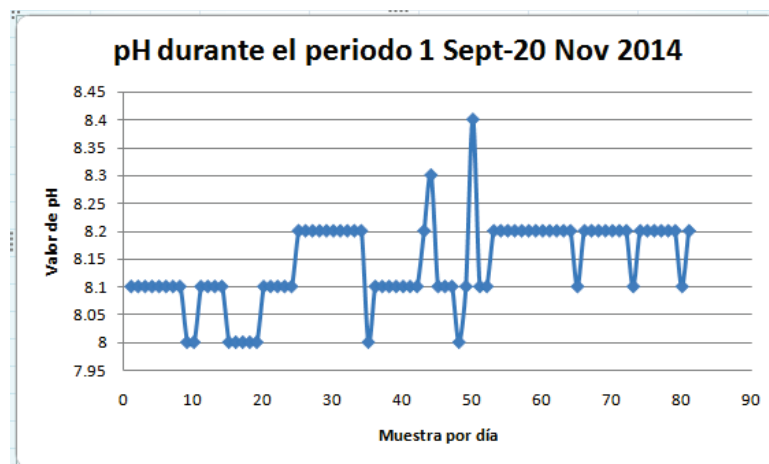


Figura 100: Medición de pH obtenido en estanque # 2 en cultivo de almeja generosa.

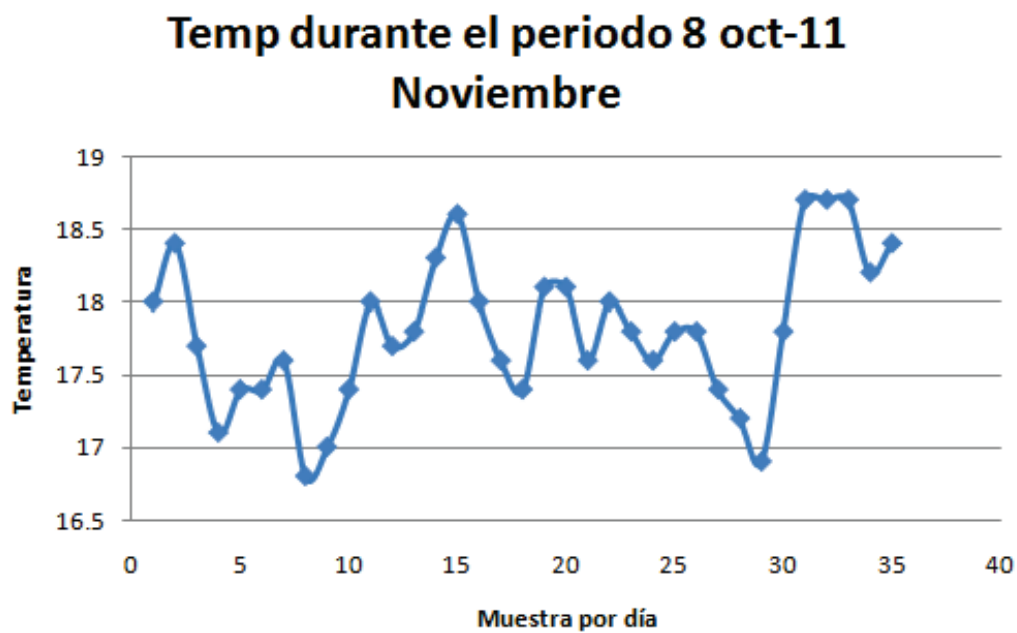


Figura 101: Medición de temperatura obtenida en estanque # 1 en cultivo de almeja generosa.

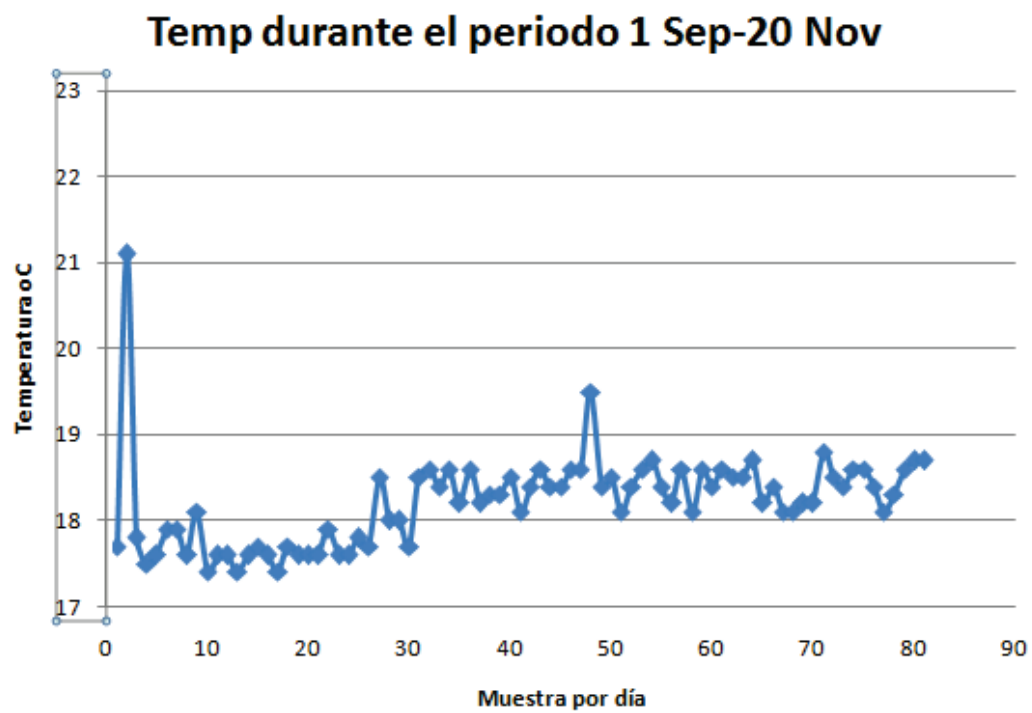


Figura 102: Medición de emperatura obtenida en estanque # 2 en cultivo de almeja generosa.

### V.3.4 Resultados de la medición de salinidad

Dado que en los cultivos realizados en los diferentes empresas, se utiliza agua de mar purificada, que esta con un valor aproximado de 35 ppt, el sistema registró las siguientes mediciones:

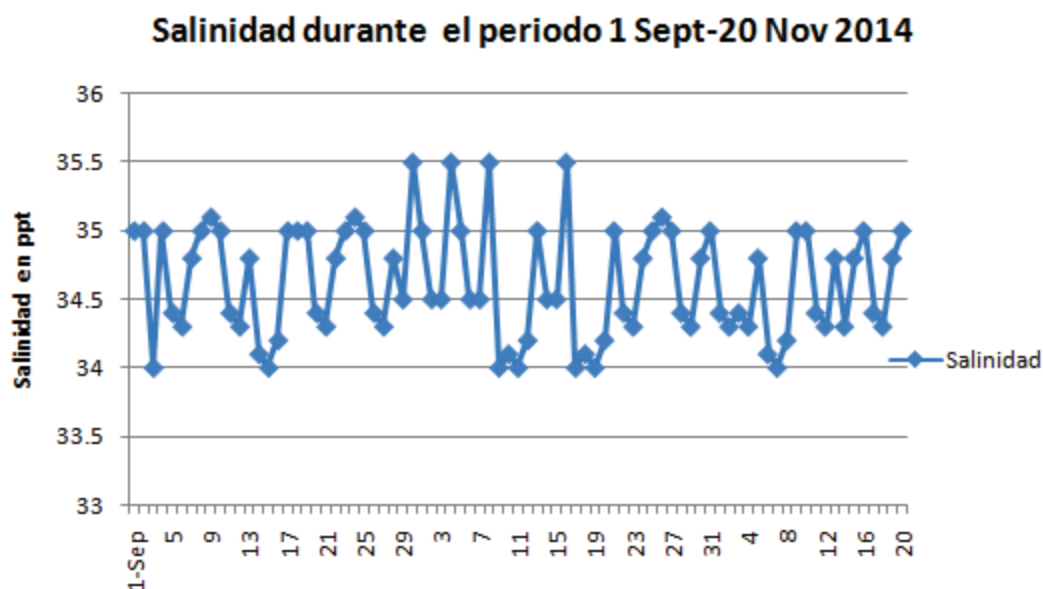


Figura 103: Medición de alinidad obtenido en estanque de cultivo de almeja generosa.

En la figura 103, se muestra la variación de salinidad en el estanque con cultivo de almeja generosa, la cual tiene una concentración de valores cercana que oscila entre 34 y 35.5 ppt (Partes por mil).

### V.3.5 Resultados de la medición de amoniaco

El sistema utiliza el cálculo del amoniaco libre a través de la medición de pH y temperatura, sin embargo, requiere a su vez la medición del TAN para obtener el valor tóxico en mg/L, por lo que se obtuvieron los siguientes valores en porcentaje de amonio tóxico, mostrados en la figura 104:

En la figura 104, se muestra la variación de  $NH_3$  en el estanque con cultivo de

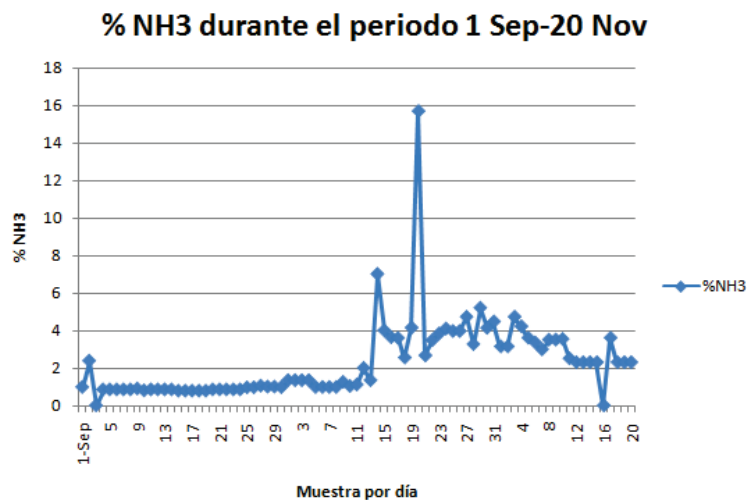


Figura 104:  $NH_3$  obtenido en estanque de cultivo de almeja generosa.

almeja generosa, la cual tiene principalmente una concentración de valores entre 1 a 4 por ciento de  $NH_3$ , se registran 2 mediciones de 7 y 16 por ciento, debido a cambios de temperatura y pH del medio, existe un peligro para las especies al superar un 20 por ciento.

## V.4 Mantenimiento de los sensores

Es muy importante realizar el mantenimiento periódico indicado por el fabricante para el sensor de pH. Algunas recomendaciones que indican son:

- Limpiarlo solamente con agua destilada o desionizada, al usar el sensor por primera vez.
- Colocarlo por 20 minutos en un buffer de 4 o 7 pH.
- **Nunca** tocar la membrana del sensor, dado que las grasas de la piel provocan un daño irreparable al sensor.
- **Nunca** dejar guardado el sensor expuesto al aire o en agua destilada. Debe de estar por lo menos en un buffer de 4 o 7 pH.

- Conforme al uso, pueden formarse cristales de KCL (cloruro de potasio) en la membrana de vidrio, en este caso debe limpiarse el sensor, se ilustra un ejemplo en la figura 105.
- Dependiendo del fabricante, se pueden usar sustancias químicas específicas para la limpieza apropiada del sensor.

Además se debe cuidar la integridad física del sensor, dado que la membrana de vidrio es frágil y puede romperse, como se observa en la figura 106.

## V.5 Conclusión

El sistema electrónico desarrollado cuenta con las características necesarias para la medición correcta y constante de las variables químicas necesarias para el cultivo. Se observa que muchas empresas que buscan un valor en calidad del producto, aun carecen de instrumentos electrónicos que aseguren la viabilidad del producto para el consumo humano.



Figura 105: Sensor de pH con formación de sarro y KCL.



Figura 106: Sensor de pH dañado por golpe físico.



# Capítulo VI

## Conclusiones generales y trabajo futuro

En el presente trabajo de tesis se presentó lo siguiente:

- Primero, la viabilidad de realizar un sistema electrónico capaz de realizar diferentes mediciones químicas en tiempo real.
- Segundo, la capacidad de procesar esta información mediante electrónica digital y realizar su envío inalámbrico por redes de comunicación inalámbricas Zigbee y GSM-GPRS.
- Tercero, la necesidad en México de implementar y desarrollar sistemas electrónica para coadyuvar en los procesos acuícolas y tener una mayor independencia tecnológica.

De lo primero se concluye que el sistema electrónico desarrollado en este trabajo de tesis permite ingresar diferentes variables químicas necesarias para el usuario, y la capacidad de ser procesadas en tiempo real mediante un sistema embebido. Dicho sistema permite a los usuarios disponer de un mayor control, menor error humano y precisión de las mediciones realizadas, además de otorgar mayor tiempo para investigaciones en el mejoramiento de los procesos y la calidad del producto, mientras que el instrumento se encarga de la medición y procesamiento de datos.

De lo segundo se concluye la ventaja de procesar esta información mediante su envío inalámbrico de datos, tanto para el registro automático de datos, los cuales son

procesados posteriormente por el usuario sustituyendo el uso de bitácoras y ahorrando tiempo en recursos humanos y además la ventaja del uso de alarmas SMS, lo cual permite al responsable o técnicos de la empresa estar al tanto del cultivo, oncluso al estar fuera del horario laboral, previniendo pérdidas económicas al haber un problema en el proceso.

De lo tercero se concluye que estos sistemas permiten obtener mayor información en tiempo y calidad, debido a que reducen en gran parte el error humano en la toma de mediciones, a su vez los sensores y los microcontroladores van mejorando en tecnología, lo cual permite una mayor calidad del producto alimenticio.

El instrumento electrónico desarrollado en este trabajo de investigación, requiere el mantenimiento constante de limpieza de los sensores ISE, además de la verificación del envío de datos inalámbricamente, para corroborar que la información ha sido recibida exitosamente, por lo cual surgen las siguientes oportunidades de mejora:

- Uso de sensores ópticos, los cuales requieren un mantenimiento menor que el uso de sensores ISE, además de mayor tiempo de vida.
- Una batería de emergencia, en caso de falla eléctrica en la empresa.
- Posibilidad de desarrollo de red de sensores Zigbee, mediante el modo API del módulo XBEE.
- Etapa de control de algunas variables de la empresa, dado que actualmente se controla manualmente por el técnico, una vez detectada la necesidad del proceso, por ejemplo, el control de oxígeno disuelto presentada por González-Soriano *et al.* (2010).

## VI.1 Trabajos a futuro

En el presente trabajo de tesis, se identificó la necesidad de la actualización tecnológica en los sistemas de acuicultura, dado que muchos de ellos carecen de sistemas de control de calidad automáticos, entre otras variables, por lo que a continuación se enlistan algunas potencialidades a desarrollar en un futuro:

- Capacitación del personal de la empresa en el uso de los instrumentos, dado que desconocen las ventajas que otorga el utilizar sistemas electrónicos de calidad y sin error humano, aumentando la productividad de la empresa.
- Desarrollar un sistema de medición de variables biológicas, que afecta en el crecimiento y/o mortalidad de las especies en cultivo.
- Desarrollar un sistema electrónico de detección de almejas generosas enterradas bajo superficie, mediante procesamiento de imágenes digitales.
- Desarrollar un sistema automático de medición de amoníaco total y libre, el cual tenga los valores de 0 a 8 mg/L, que son el parámetro utilizado por los acuicultores.
- Desarrollar un software para empaquetado automático y generación de base de datos de carga y descarga de productos.
- Desarrollar un software para subir la información a internet de las distintas variables físico -químicas implícitas en los procesos de acuicultura, de tal forma que puedan ser monitoreadas remotamente por el responsable de la empresa.
- Desarrollar un instrumento para medición de calidad del agua, por ejemplo, para medir cloro libre, a cual es una variable crítica que puede poner en riesgo la salud de la humanidad.

# Bibliografía

Almeja Generosa [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.cedmex.com.mx](http://www.cedmex.com.mx).

Anderson Guarnizo Franco, P. (2015). *Química General Práctica*. Elizcom S.a.s. ISBN 9789584443410.

Arevalo, A. y Pastor, G. (1985). Verification of the nernst equation and determination of a standard electrode potential. *Journal of Chemical Education*, **62**(10): 882.

Axelson, J. (2015). *USB Complete: The Developer's Guide, Fifth Edition*:. Complete Guides Series. Lakeview Research LLC. ISBN 9781931448284.

Bückle, L. F., Barón, B., Hernández, M., Ledo, A., Solís, R., Pérez, B., y Hernández, A. (2003). Sistema de temperatura, oxígeno y salinidad para la experimentación en ecofisiología system for temperature, oxygen and salinity research in ecophysiology. *Hidrobiológica*, **13**(4): 277–287.

Buffer de 0 mg/L [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.atlas-scientific.com/m](http://www.atlas-scientific.com/m).

Buffer para circuito EZO [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.atlas-scientific.com/m](http://www.atlas-scientific.com/m).

Calculadora Arduino [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.vathsav.com](http://www.vathsav.com).

Catálogo de productos Sainsmart [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.sainsmart.com](http://www.sainsmart.com).

Circuito adaptador de pH para microcontroladores [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.phidgets.com](http://www.phidgets.com).

Colt, J. y Huguenin, J. E. (2002). *Design and operating guide for aquaculture seawater systems*, Vol. 33. Elsevier.

Cooper, N. S. (1988). The effect of salinity on tropical ocean models. *Journal of physical oceanography*, **18**(5): 697–707.

- Crosby, N. (1968). Determination of ammonia by the nessler method in waters containing hydrazine. *Analyst*, **93**(1107): 406–408.
- Cultivo de microalgas [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.fao.org](http://www.fao.org).
- da Silva, F. J. R., dos Santos Lima, F. R., do Vale, D. A., do Carmo, M. V., *et al.* (2013). High levels of total ammonia nitrogen as  $\text{NH}_4^+$  are stressful and harmful to the growth of Nile tilapia juveniles-doi: 10.4025/actasciobiolsci. v35i4. 17291. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, **35**(4): 475–481.
- Educación técnica de electrodo de pH [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.sensorex.com](http://www.sensorex.com).
- Educación técnica de sensor de conductividad [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.sensorex.com](http://www.sensorex.com).
- Emerson, K., Russo, R. C., Lund, R. E., y Thurston, R. V. (1975). Aqueous ammonia equilibrium calculations: effect of pH and temperature. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, **32**(12): 2379–2383.
- Ercilla, S. y Muñoz, C. (2003). *Física general*. Tébar. ISBN 9788495447821.
- Faludi, R. (2010). *Building Wireless Sensor Networks: with ZigBee, XBee, Arduino, and Processing*. O'Reilly Media. ISBN 9781449302740.
- Fromm, P. O. y Gillette, J. R. (1968). Effect of ambient ammonia on blood ammonia and nitrogen excretion of rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Comparative biochemistry and physiology*, **26**(3): 887–896.
- García, I. L. y Sotorrío, L. L. (2012). Modelo explicativo de la rentabilidad de las empresas de piscicultura marina. aplicación empírica a la cría de dorada (*Sparus aurata*) y lubina (*Dicentrarchus labrax*) en España. *Economía agraria y recursos naturales*, **12**(2): 31–55.

- González-Peláez, S. S. y Luch-Cota, D. B. (2010). Cambio climático y la pesquería de la almeja generosa (*panopea spp*) en el pacífico mexicano. *CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO*, página 519.
- González-Soriano, G., Ortega-Corral, C., González-Vázquez, S., y Maeda-Martínez, A. (2010). Remote web monitoring and activation of an experimental on-off dissolved oxygen concentration control model applied to aquaculture tanks. En *ELMAR, 2010 PROCEEDINGS*, páginas 167–171. IEEE.
- GSM Shield [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.robotshop.com](http://www.robotshop.com).
- Hampson, B. (1977). Relationship between total ammonia and free ammonia in terrestrial and ocean waters. *Journal du Conseil*, **37**(2): 117–122.
- Harris, D., Navarro, V., y Murcia, Á. (2006). *Análisis químico cuantitativo*. Reverté. ISBN 9788429172249.
- Henkel, R., Buck, B. H., Cembella, B., Fisch, R., y Zielinski, O. (2007). Implementation of a sensor suite for an aquaculture plant using chemical-reagent-free measuring methods. *oceans 2007–europe*, 1-4.
- Hoja de datos circuito EZO para DO [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.atlas-scientific.com/m](http://www.atlas-scientific.com/m).
- Hoja de datos de circuito EZO de conductividad [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.atlas-scientific.com/m](http://www.atlas-scientific.com/m).
- Hoja de datos de sensor DO6400 [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.sensorex.com](http://www.sensorex.com).
- Hoja de datos módulo Xbee [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.digi.com](http://www.digi.com).
- Hoja de datos sensor ISE amoníaco [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.jumo.de](http://www.jumo.de).
- Imanaka, N., Tamura, S., y Adachi, G. (1998). Ammonia sensor based on ionically exchanged  $\text{nh}_4^+$  gallate solid electrolytes. *Electrochemical and solid-state letters*, **1**(6): 282–284.

- Kaiser, G. E. y Wheaton, F. W. (1988). Computerized rapid measurement of ammonia concentration in aquaculture systems. En *OCEANS'88. A Partnership of Marine Interests. Proceedings*, páginas 76–83. IEEE.
- Khoo, K., Culberson, C. H., y Bates, R. G. (1977). Thermodynamics of the dissociation of ammonium ion in seawater from 5 to 40 c. *Journal of Solution Chemistry*, **6**(4): 281–290.
- Kim, E. K., Ceong, H., y Jung, S.-J. (2007). Environmental sensor data visualization for aquafarm monitoring. En *Frontiers in the Convergence of Bioscience and Information Technologies, 2007. FBIT 2007*, páginas 884–888. IEEE.
- Kit de medición de pH comercial [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.topicalinfo.org](http://www.topicalinfo.org).
- Langosta Roja de Baja California [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.mexicocampoadentro.org](http://www.mexicocampoadentro.org).
- LED de circuito EZO [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.atlas-scientific.com](http://www.atlas-scientific.com).
- Lewis, E. y Perkin, R. (1981). The practical salinity scale 1978: conversion of existing data. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, **28**(4): 307–328.
- Lipke, H. (1991). *Panulirus interruptus*. *FAO Fisheries Synopsis No. 125. Food and Agriculture Organization*, **13**: 142–143.
- Lista de comandos para circuito EZO [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.atlas-scientific.com/m](http://www.atlas-scientific.com/m).
- Lloyd, R. y Herbert, D. (1960). The influence of carbon dioxide on the toxicity of unionized ammonia to rainbow trout (*salmo gairdnerii richardson*). *Annals of applied Biology*, **48**(2): 399–404.
- Martínez, M. A. S. (2006). Manejo del cultivo de tilapia. *Nicaragua, BIDEAUSAID*, página p15.

- Medición de temperatura con Arduino Ethernet [Online] (20 de Mayo de 2011). [cdn.instructables.com](http://cdn.instructables.com).
- Monk, P. (2008). *Physical Chemistry: Understanding our Chemical World*. Wiley. ISBN 9780470358269.
- Naylor, R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H., y Troell, M. (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, **405**(6790): 1017–1024.
- Neelamegam, P., Kumaravel, S., y Raghunathan, R. (2008). Microcontroller based distributed monitoring system for fresh water fish aquaculture. *Instrumentation Science and Technology*, **36**(5): 515–524.
- Pantalla LCD [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.amazon.com](http://www.amazon.com).
- Relación de rango de operabilidad con calibración [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.atlas-scientific.com/m](http://www.atlas-scientific.com/m).
- Roller, D. y Blum, R. (1986). *Física*. Número v. 2 en Física (Reverté). Reverté. ISBN 9788429143393.
- SAGARPA (2007). *Programa de investigación para el seguimiento de la pesquería de almeja generosa (Panopea spp.) en las Costas de Baja California, México, Prospección y evaluación de nuevas áreas de aprovechamiento..* CONAPESCA Mazatlán, Sinaloa.
- Sensor de conductividad [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.sensorex.com](http://www.sensorex.com).
- Sensor de pH para uso industrial [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.phidgets.com](http://www.phidgets.com).
- Sensor DS18B20 [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.intellihome.be](http://www.intellihome.be).
- Shezifi, Y., Kimmel, E., y Diamant, A. (1997). The electrophysiological response of fish to hypoxia. *Aquacultural engineering*, **16**(4): 253–259.
- Spotte, S. y Adams, G. (1983). Estimation of the allowable upper limit of ammonia in saline waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **10**(207): 10.



- Tarjetas Arduino [Online] (20 de Mayo de 2011). [store.arduino.cc](http://store.arduino.cc).
- Teclado matricial [Online] (20 de Mayo de 2011). [www.circuitstoday.com](http://www.circuitstoday.com).
- Técnicas electroanalíticas [Online] (22 de Enero de 2015). [www.tecnicaselectroanaliticas.blogspot.mx](http://www.tecnicaselectroanaliticas.blogspot.mx).
- Thomas, S. L. y Piedrahita, R. H. (1997). Oxygen consumption rates of white sturgeon under commercial culture conditions. *Aquacultural engineering*, **16**(4): 227–237.
- Thurston, R. V., Russo, R. C., y Emerson, K. (1979). *Aqueous ammonia equilibrium: tabulation of percent un-ionized ammonia*. Environmental Research Laboratory-Duluth, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Tidwell, J. H. y Allan, G. L. (2001). Fish as food: aquaculture's contribution. *EMBO reports*, **2**(11): 958–963.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T., y Vinci, B. J. (2002). *Sistemas de recirculación para la acuicultura*. Fundación Chile.
- Unidad de Biotecnología en Piscicultura [Online] (20 de Mayo de 2011). [oceanologia.ens.uabc.mx](http://oceanologia.ens.uabc.mx).
- Vaddadi, S. K., Sadistap, S., y Kumar, P. (2012). Development of embedded wireless network and water quality measurement systems for aquaculture. En *Sensing Technology (ICST), 2012 Sixth International Conference on*, páginas 637–641. IEEE.
- Wang, X., Ma, L., y Yang, H. (2011). Online water monitoring system based on zigbee and gprs. *Procedia Engineering*, **15**: 2680–2684.
- Weiss, R. (1970). The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. En *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, Vol. 17, páginas 721–735. Elsevier.
- Whitfield, M. (1974). The hydrolysis of ammonium ions in sea water-a theoretical study. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, **54**(03): 565–580.

- Wolf, M. (2012). *Computers as components: principles of embedded computing system design*. Elsevier.
- Wu, M., Zhang, X., y Wu, T. (2010). Research on the aquaculture multi-parameter monitoring system. En *Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR), 2010 2nd International Asia Conference on*, Vol. 1, páginas 76–79. IEEE.

## Apéndice A

# Programación de comandos de circuito EZO

### A.0.1 Circuito EZO de salinidad

Para obtener un valor del sensor de salinidad, se utiliza la siguiente rutina de ejemplo:

```

        if ( band == 0){           //if a string from the PC has been r
band = 1;
Serial3.print(Temp_string);      //send that string to
Serial3.print("\r");
delay(10);
Serial3.print("r");
//send that string to the Atlas Scientific product
Serial3.print("\r");
delay(10);

```

Donde el valor de Serial3.print corresponde al envío de los comandos al circuito digital EZO, como se puede observar, se envía el valor de la temperatura para obtener una medición más exacta de la salinidad, y se realiza el envío del caracter **r** para obtener una medición del sensor de conductividad.

Para obtener el valor de la salinidad, se recurre a lo siguiente:

```

void serialEvent1(){
//if the hardware serial port_1 receives a char salinidad
        char inchar3 = (char)Serial1.read();
//get the char we just received
        inchar7 = inchar3;

```

```

        sensorstring5 += inchar3;
//add it to the inputString

        if ( inchar7 >= 48 && inchar7 <= 57 && contacoma == 0){
Conduc_string += inchar3;
        }

        if ( inchar7 >= 48 && inchar7 <= 57 && contacoma == 1){
TDS_string += inchar3;
        }

        if(inchar3 == ','){
contacoma = contacoma + 1;
        }

        if (contacoma >= 2 && inchar3 != ',' && inchar3 != '\r'){
contasal = contasal + 1;
Sal_string += inchar3;

        if ( contasal == 1){
numsal = inchar3 - 48;
sal_num = numsal;
        }

        if ( contasal == 2 ){
numsal2 = inchar3 -48;
sal_num = (numsal * 10) + numsal2;
        }
}

```

```

    if(inchar3 == '\r') {
        sensor_stringcomplete3 = true;    //if the incoming character
        inchar3 = '_';
    }
}

```

En esta parte del código se obtienen los tres valores que arroja el sensor de conductividad, los cuales son TDS, conductividad y salinidad. Dichos valores son obtenidos en formato caracter, por lo que es necesario realiza su conversión a un valor numérico, para poder ser desplegados adecuadamente en la pantalla LCD y en el envío de la alarma programada.

### A.0.2 Circuito EZO para oxígeno disuelto

La forma de envío automático de comandos es el siguiente:

```

    if ( band == 0){    //if a string from the PC has been received
        band = 1;
        Serial3.print(Temp_string);    //send that string to the Atlas Scientific product
        Serial3.print("\r");
        delay(10);
        Serial3.print("r");
        Serial3.print("S");
        Serial3.print("35");
        Serial3.print("PPT");
        //send that string to the Atlas Scientific product
        Serial3.print("\r");
        delay(10);
    }
}

```

Donde el valor de Serial3.print corresponde al envío de los comandos al circuito digital EZO, como se puede ver, se envía el valor de la temperatura para obtener una medición mas exacta del oxígeno disuelto, en el caso de la salinidad se envia el comando **S,35,PPT**, el cual envía el comando ASCII para ingresar el valor de la salinidad en



```

DATO4 = inchar2 - 48;
    }

    if( CONTA == 4 && BANDERA == 2){
    DATO2 = (inchar2 - 48)/10.0;
    Oxi_num = (DATO*10) + DATO4 + DATO2;
    }

```

En esta parte del código se obtienen el valor del oxígeno disuelto en mg/L. Dicho valor es obtenido en formato caracter, por lo que es necesario realiza su conversión a un valor numérico, para poder ser desplegados adecuadamente en la pantalla LCD y en el envío de la alarma programada.

### A.0.3 Sensor de temperatura DS18B20

El código requiere de la utilización de dos librerías, que deben ser instaladas antes de cargar el código a la placa. Estas son:

- Dallas Temperature
- OneWire

```

void loop() {
#include <OneWire.h> //Se importan las bibliotecas
#include <DallasTemperature.h>
#define Pin 2 //Se declara el pin donde se conecta la DATA
OneWire ourWire(Pin); //Se establece el pin declarado como bus para la co
DallasTemperature sensors(&ourWire); //Inicio de bibliotecta DallasTemper
void setup() {
    delay(1000);
    Serial.begin(9600);
    sensors.begin(); //Se inician los sensores
}
void loop() {

```

```
sensors.requestTemperatures(); //Prepara el sensor para la lectura
temp=sensors.getTempCByIndex(0); Guarda el valor del sensor 0 en la variable temp
Serial.print(sensors.getTempCByIndex(0)); //Se lee e imprime la temperatura en Celsius
Serial.print(sensors.getTempFByIndex(0)); //Se lee e imprime la temperatura en Fahrenheit
delay(100);
```

Al obtener el valor de la temperatura en la variable **temp**, solo es necesario desplegar dicho valor en el puerto serie o en el LCD del microcontrolador con el comando **lcd.print(temp);**

#### A.0.4 Envío de mensajes SMS

Este es un ejemplo en el envío de la temperatura y el oxígeno disuelto medido.

```
mySerial.print("AT+CMGF=1\r"); //Because we want to send the SMS in text mode
delay(100);
A.concat("AT+CMGS=\r"+52);
A.concat(T);
A.concat("\r\r\r");
mySerial.println(A); //send sms message, be careful need to add a country code
delay(100);
mySerial.println("Comenzando"); //the content of the message
mySerial.println("La Temperatura es:"); //the content of the message
mySerial.print("T="); //the content of the message
mySerial.print( temperatura ); //the content of the message
mySerial.println(" °C"); //the content of the message
mySerial.println("El oxígeno es:"); //the content of the message
mySerial.print("O="); //the content of the message
mySerial.print( oxigeno ); //the content of the message
mySerial.println(" mg/L "); //the content of the message
delay(100);
mySerial.println((char)26); //the ASCII code of the ctrl+z is 26
delay(100);
mySerial.println();
```



Dicho programa realiza lo siguiente:

- Envía un comando al módulo GSM para realizar el envío de un mensaje SMS.
- Recupera la información del número celular al que se esta enviando, que se encuentra en la variable **A.concat(T)**;
- Se describen los caracteres que serán enviados en el mensaje SMS.
- Se cierra la rutina del envío de mensajes SMS.

# Apéndice B

## Glosario

- ISE: Electrodo de ión selectivo.
- EEPROM: Memoria de solo lectura programable y borrrable eléctricamente.
- ASCII: Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información.
- RF: Radio Frecuencia.
- dB: Decibeles.
- PC: Computadora personal.
- $\mu$ C: Microcontrolador.
- SMS: Servicio de mensaje corto.
- pH: Potencial de hidrógeno.
- ppm: Partes por millón.
- SAMOS: Apilado avalancha de compuertas de inyección de semiconductor metal-óxido.
- OP-AMP: Amplificador operacional.
- DO: Oxígeno disuelto.
- ppt: Partes por mil.
- LCD: Pantalla de cristal líquido.
- ADC: Conversión analógica a digital.

- UART: Transmisor-Receptor Asíncrono Universal.
- USART: Transmisor-Receptor Asíncrono Síncrono Universal.
- I2C: Inter-Circuitos Integrado.
- USB: Bus Universal Serie.
- WPAN: Red inalámbrica de área Personal.
- HDPE: Polietileno de alta densidad.
- GSM: Sistema global para las comunicaciones móviles
- GPRS: Servicio general de paquetes vía radio.
- SIM: Módulo de Identificación del Suscriptor.

# Apéndice C

## Publicaciones y reconocimientos

### C.0.5 Publicaciones derivadas del trabajo de tesis de maestría

**Liera Grijalva César Alberto**, Inzunza González Everardo, García Guerrero Enrique Efrén, Navarro Rodríguez Andrés y López Bonilla Oscar Roberto. *Sistema de control digital ON-OFF por histéresis con comunicación inalámbrica para aplicaciones acuícolas*. Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica. Mem. Electro 2014, Vol. 36, pp 75-81, Chihuahua, Chih. México ISSN 1405-2172.

### C.0.6 Publicaciones en colaboración

Navarro Rodríguez Andrés, García Guerrero Enrique Efrén, Inzunza González Everardo, **Liera Grijalva César Alberto** y López Bonilla Oscar Roberto. *Sistema automático para conteo de peces utilizando sensores infrarrojos y comunicación inalámbrica*. Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica. Mem. Electro 2014, Vol. 36, pp 75-81, Chihuahua, Chih. México ISSN 1405-2172

### C.0.7 Reconocimientos

Participación en el Pabellón UABC en Ciencia y Tecnología, en Baja Sea Food 2013-2014.

Desarrollo tecnológico: *Sistema de Monitoreo Autónomo y en Tiempo Real de las Variable Físico- Químicas Inmersas en los Procesos de Cultivo de la Almeja Generosa*. Para la empresa Productos Oceánica y Maricultivos Miramar, ENERO 2014