

Recibido 29 de octubre 2021. Aceptado 03 de diciembre 2021. Publicado 23 de diciembre 2021.

ISSN: 2448-7775

Camino al sensor inteligente de oxígeno disuelto en la acuicultura

ADRIÁN TINTOS GÓMEZ*, JOEL SALOME BAYLON, JUAN ANTONIO DÍAZ GÓMEZ, OLVIN JOEL BARRERA MENDEZ.

Universidad Tecnológica de Manzanillo

*Autor de correspondencia: adrian-tintos@utem.edu.mx

RESUMEN En este trabajo se sientan las bases para un sensor de oxígeno disuelto inteligente, para ello se diseñó un sistema de arquitectura abierta que adquiere las mediciones de oxígeno disuelto en tiempo real. Se tiene compensación de temperatura, presión y salinidad en el sensor y su comunicación para evitar ruido puede ser UART o I2C. Para evitar que la membrana del sensor se dañe, se diseñó una grúa la cual sube y baja el dispositivo para que tome la medida de oxígeno, se utiliza otro sistema de control para no contaminar las mediciones. El sistema diseñado funciona correctamente, arrojando un error del 1% comparado con un medidor YSI, y de un 4.6 % comparado con un medidor HANNA.

PALABRAS CLAVE— Oxígeno disuelto, tiempo real, acuicultura.

I. INTRODUCCIÓN

El Oxígeno Disuelto (OD) juega un papel importante en la acuicultura. El estrés por bajo OD se indica en 1.4 mg/L, aunque en general, 2.0 mg/L se asocia con crecimiento limitado y riesgo alto de mortalidad [1, 4]. El nivel de 4.5 mg/L o superior se considera ideal en la producción acuícola [2, 3]. El bajo nivel de oxígeno disuelto en el agua puede provocar hipoxia, crecimiento lento y muerte en camarones y peces. El nivel bajo de la concentración de oxígeno puede deberse a varias razones [2, 5]: (i) El oxígeno disuelto disminuye con el aumento de temperatura y salinidad; (ii) Las plantas acuáticas mueren debido al uso excesivo de los herbicidas [4, 5]; (iii) El oxígeno disuelto normalmente disminuye durante la noche. Durante el día las microalgas pueden generar oxígeno por medio de la fotosíntesis, sin embargo, la oxidación de alimento no consumido, el nitrógeno amoniacal, el fosfato y el consumo de oxígeno propio de los organismos por medio de la respiración disminuyen considerablemente los niveles de oxígeno disuelto, estos niveles pueden ser más críticos por las noches. Situación similar puede ocurrir en días con poca luz solar o con días nublados y lluviosos. Para no poner en riesgo el cultivo, la implementación de aireadores eléctricos es fundamental.

Como se mencionó anteriormente, el oxígeno disuelto es un índice de evaluación importante para el crecimiento saludable de los organismos acuáticos [6]. En condiciones de cultivo de peces de alta densidad, la concentración de oxígeno disuelto puede cambiar de un nivel óptimo a un nivel letal en horas o incluso minutos, mientras que otras variables

clave en el entorno cultural no son tan dinámicas [7]. Por lo tanto, es de vital importancia estudiar la tecnología de medición precisa y en tiempo real del oxígeno disuelto [8].

Los principales métodos de determinación de oxígeno disuelto incluyen la valoración yodométrica [9], el método electroquímico y el método óptico [10]. La valoración yodométrica es un método químico clásico de referencia, para determinar oxígeno disuelto reconocido internacionalmente [11]. El método tiene una alta precisión, pero tiene limitaciones con procedimientos complejos y la imposibilidad de realizar una detección en línea [12]. La detección electroquímica es el método más utilizado y el sensor de oxígeno es la aplicación más común. Este método tiene una velocidad de detección relativamente alta, pero su proceso de detección consume oxígeno, y los sensores basados en este principio deben calibrarse y darles mantenimiento con regularidad [13]; por lo tanto, no se pueden realizar mediciones *in situ* a largo plazo. En el método óptico, el sensor de oxígeno disuelto está basado en el principio de extinción de la fluorescencia lo cual hace que sea pequeño [14], no consume oxígeno y tiene una alta capacidad anti-interferencias [15]. En general, el sensor de extinción de fluorescencia requiere un mantenimiento menos frecuente, funciona con facilidad, puede realizar una detección en línea continua, pero la medición precisa sigue siendo difícil de lograr [16].

En la producción y aplicación real, el cambio en la concentración de oxígeno disuelto es un proceso continuo y dinámico; por lo tanto, un método de detección de oxígeno disuelto en tiempo real de alta precisión es esencial. Aunque

muchos expertos quieren mejorar los métodos tradicionales al confiar en la ciencia de los materiales, es complicado [17]. Un sensor inteligente de oxígeno disuelto puede realizar el procesamiento de señales analógicas y digitales recolectadas, realizar una transmisión inteligente y una conexión "plug and play". Al mismo tiempo, a través de la combinación de software y hardware, el sensor de oxígeno puede compensar y corregir los resultados de detección en tiempo real [18].

En resumen, el sensor inteligente de oxígeno disuelto tiene la capacidad de adquisición de señales en tiempo real y datos inteligentes. Procesamiento, que puede cumplir con los requisitos de la medición *in situ* a largo plazo de la medición del oxígeno disuelto y superar eficazmente los problemas de la tecnología de detección tradicional [19]. Por lo tanto, es urgente desarrollar un sensor inteligente de oxígeno disuelto con medición en tiempo real y funciones precisas de procesamiento de datos [20].

II. DESARROLLO

A. SISTEMA DISEÑADO

Se diseña un medidor de oxígeno disuelto (Fig. 1) de arquitectura abierta para volverlo inteligente, el cual realiza las mediciones en tiempo real y las guarda en una base de datos. El sistema que se propone se divide en dos partes, esto para evitar contaminar las mediciones.

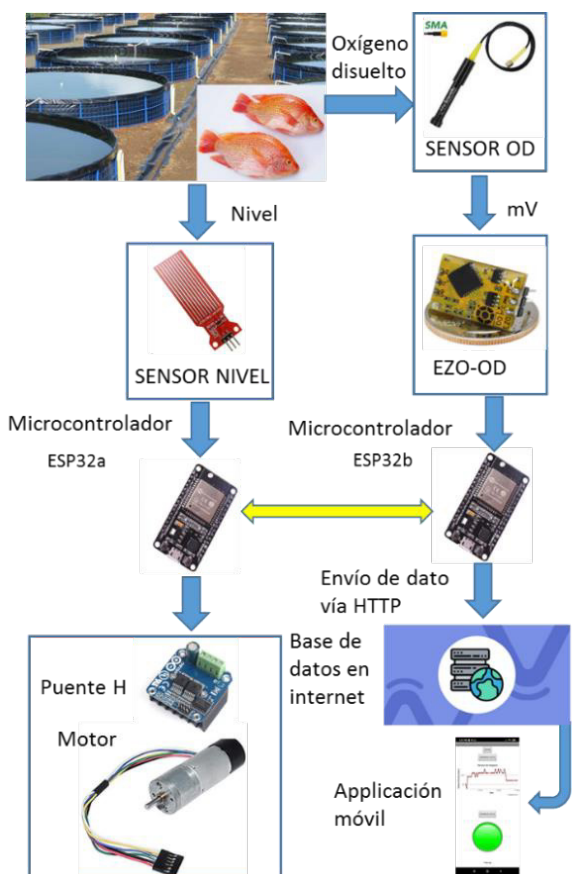


Fig. 1. Sistema diseñado (medidor de oxígeno disuelto).

La primera parte es la que se encarga de introducir el sensor en un estanque de tilapias para llevar a cabo la medición de oxígeno. Mediante un microcontrolador esp32 cada 10 minutos se activa un motor para bajar el sensor, y se verifica si está a la distancia deseada mediante un sensor de nivel, si está a la distancia deseada se envía una señal al otro microcontrolador para que tome el dato y se espera una señal que indique que finalizó la adquisición, finalmente se activa el motor para recoger el sensor a su posición inicial y repetir el proceso. La segunda parte es la que lleva a cabo la medición de oxígeno. Con un microcontrolador esp32, mediante el protocolo rs-232 se adquieren las señales del EZO-OD, el cual obtiene la medición de oxígeno del sensor. Una vez adquirida la medida, se envía a una base de datos donde se almacena, para que posteriormente se consulte mediante una aplicación.

B. SENSOR DE OXÍGENO

Los principios en la detección de oxígeno disuelto y en como volverlos inteligentes es mediante: la transmisión inteligente, el procesamiento de señal y la compensación, y corrección en tiempo real (Fig. 2, 3) [21]. El sensor utilizado es el *Lab Grade Dissolved Oxygen Probe* de Atlas Scientific (Tabla I).

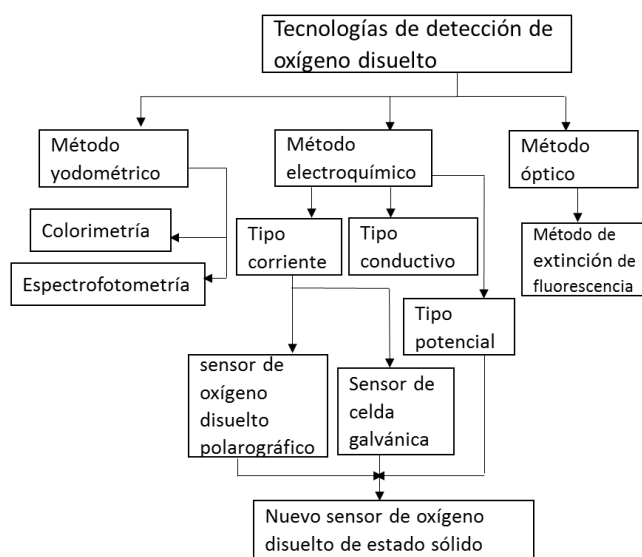


Fig. 2. Métodos tradicionales en la detección de oxígeno disuelto.

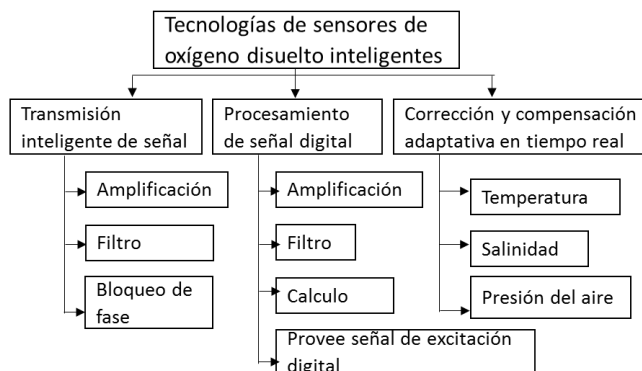


Fig. 3. Tecnología sensores inteligentes.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR DE OXIGENO DISUELTO.

Lecturas	Oxígeno Disuelto
Rango	0-100 mg/ L
Precisión	+ 0 - 0.05 mg/ L
Conector	Macho BNC
Tiempo de respuesta	0.3 mg/L / segundo
Presión máxima	3447 kPa (500 PSI)
Profundidad máxima	343 m (1125 ft)
Rango de temperatura	1-50 °C
Longitud de cable	1 m
Temperatura interna de sensor	No Aplica
Tiempo antes de recalibración	1 año
Expectativa de vida útil	5 años
Mantenimiento	Cada 18 meses

TABLA II. CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO EZO-OD.

Lecturas	Oxígeno disuelto
Rango	0-100 mg/ L 0.1-400+ % saturación
Precisión	+ 0 - 0.05 mg/ L
Conector	Macho BNC
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Sondas compartibles	Sonda galvánica
Temperatura compensada	Si
Salinidad compensada	Si
Presión compensada	Si
Protocolo de comunicación	UART & I2C
Voltaje de operación	3.3 a 5
Calibración	1 o 2 puntos
Formato de los datos	ASCII

El sensor de oxígeno disuelto es una sonda galvánica que consta de una membrana de politetrafluoroetileno (PTFE) más conocido como teflón, un ánodo de zinc bañado en un electrolito (70% agua, 15 cloruro de sodio y 15% de Tetraborato sódico o bórax), y un cátodo de plata (Fig. 4). Las moléculas de oxígeno se separan a través de la membrana de la sonda, a una velocidad constante (sin la membrana, la reacción ocurre rápidamente). Una vez las moléculas de oxígeno han atravesado la membrana se reducen en el cátodo y se produce una pequeña tensión. Si no hay moléculas de oxígeno presentes, la sonda emitirá 0 mV. A medida que aumenta el oxígeno, también lo hace la salida de mV de la sonda. Cada sonda emite un voltaje diferente en presencia de oxígeno. Lo único constante es 0 mV = 0 Oxígeno.

C. EZO™ DISSOLVED OXYGEN CIRCUIT

Calcular con precisión el OD del agua es bastante difícil. Una vez realizados todos los cálculos matemáticos, se necesitan cientos de pruebas químicas para confirmar que las lecturas son correctas en toda la escala. El circuito EZO-OD de Atlas Scientific proporciona las lecturas del OD en mg/L y el porcentaje de saturación. Con las funciones de compensación de temperatura, salinidad y presión, las lecturas son correctas (Tabla II).

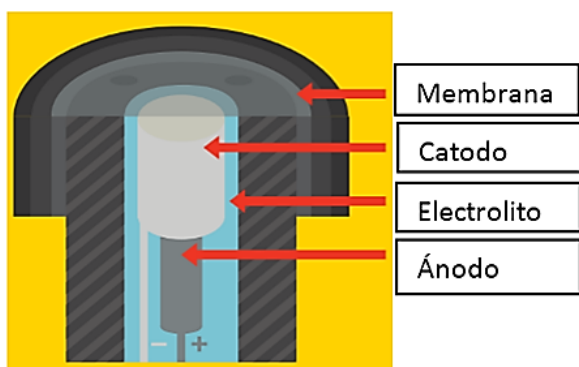


Fig. 4. Componentes de los sensores inteligentes.

D. ESP32

El ESP32 es una serie de SoC (por sus siglas en inglés, *System on Chip*) y módulos de bajo costo y bajo consumo de energía creado por Espressif Systems. Sus características más notables son, además de Wi-Fi, también soporta Bluetooth, tiene un procesador dual Xtensa® LX6 de 32 bits, es compatible con Arduino con el plugin adecuado, su velocidad de reloj está entre 160 Mhz y 240 Mhz, tiene 520 Kb de RAM, tiene 16 convertidores analógicos digitales, tiene 36 pines digitales y cuenta con diferentes protocolos de comunicación como UART, I2C y SPI.

La programación que se realiza en el ESP32a es la que corresponde a la grúa (Fig. 5). Consiste en esperar 10 minutos y bajar el sensor para que tome una medida, indicándole al otro programa que puede tomar la medida y esperando a que el otro programa le indique que la adquirió, se sube el motor por 3 segundos y se indica que no se puede medir.

El segundo ESP32b se muestra a la derecha de la Fig. 5. Se mantienen en espera hasta que el otro programa le indique que puede tomar la medición, posteriormente se cuentan 5 minutos para adquirir el dato y enviarlo a ThingSpeak, el tiempo de espera es para estabilizar la medida del sensor. Finalmente se indica al otro programa que se realizó la medición de oxígeno.

E. BASE DE DATOS

ThingSpeak es una plataforma del internet de las cosas (Internet of things, IoT) diseñada para habilitar conexiones significativas entre personas y dispositivos. Entre sus características están la recolección de datos, análisis de datos, procesamiento de datos, visualización de datos usando un servicio de redes vía interfaz de programación de aplicaciones (Application Programming Interfaces, API) de código abierto, mismo que soporta diversas plataformas. Todo esto ayuda a transferir fácilmente datos desde sistemas embebidos tales como Arduino, Raspberry PI, NodeMCU,

etc. También es compatible con diversos lenguajes y sistemas. Su principal objetivo es diseñar e implementar un sistema autónomo para visualizar gráficas de la información censada (Fig. 6). Los datos obtenidos pueden ser vistos globalmente en cualquier momento.

F. APLICACIÓN

La aplicación utilizada es capaz de ver los datos del sensor de oxígeno, así como de saber si está midiendo o no con la opción de “sensor data”, por otro lado, existe la opción de observar el estado actual del aireador, así como ordenarle que se encienda o apague mediante una orden enviada a ThingSpeak para que actualice el estado del aireador, dicha orden puede ser leída desde una ESP32 vía HTTP para así, activar un relevador y con ello el motor del aireador (Fig. 7).



Fig. 7. Aplicación diseñada en APP INVENTOR.

G. GRÚA

Se diseña una grúa (Fig. 8), ya que el sensor no puede permanecer todo el tiempo en el agua. Se diseña la estructura, la cual sostiene un tubo, donde en un extremo se coloca un motor que enrollará o desenrollará un hilo, el cual sostendrá al sensor de oxígeno en el otro extremo.

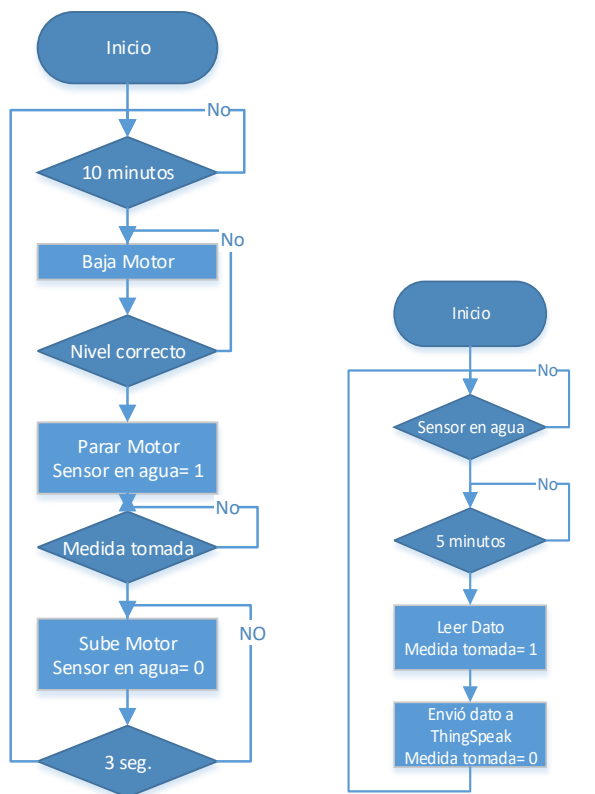


Fig. 5. Programación en los microcontroladores ESP32.

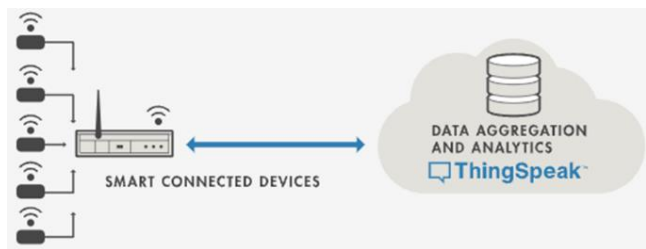


Fig. 6. Base de datos ThingSpeak.



Fig. 8. Grúa para subir y bajar el sensor.

III. RESULTADOS

Construido y calibrado el sistema, se procede a realizar pruebas en la granja acuícola de San Buenaventura Manzanillo, México, con ubicación 19.01361111, -104.16055556. El sistema es colocado en un estanque de tilapia como se muestra en la Fig. 9. Se coloca un celular el cual cuenta con un paquete de internet para subir los datos a la nube.

Se muestra la medición del sistema propuesto (3 mg/L) comparándose con el YSI PRO 20 (3.03 mg/L) y HANNA HI98194 (3.14 mg/L), teniendo un 1% de error comparado con el YSI, y de 4.6% comparado con el HANNA (Fig. 10).

Se muestran las mediciones del sensor cuando mide dentro del agua y cuando mide fuera del agua, se observa que se mantiene estable en 3 mg/L, cuando está dentro del agua y 8-9 mg/L cuando está fuera del agua (Fig. 11). Los medidores comerciales se comportan de la misma forma.

IV. CONCLUSIONES

Se cumple el objetivo de obtener un sistema de monitoreo de oxígeno disuelto en tiempo real, de arquitectura abierta y susceptible de mejoras. Los errores obtenidos no exceden el 5% y en el caso del YSI el 1%, equipo que se compró y calibró exclusivamente para esta prueba. El presente trabajo es un probatorio de la vinculación de la Universidad Tecnológica de Manzanillo con el sector productivo, en pro del desarrollo sostenible de la actividad acuícola. Además, de ser pioneros en la región de los albores de una industria acuícola 4.0.



Fig. 9. Sistema de medición.



Fig. 10. Mediciones de la App vs medidores comerciales.

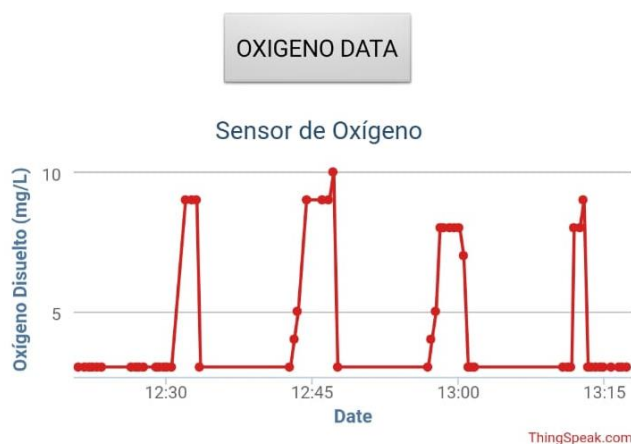


Fig. 11. Mediciones sensor oxígeno disuelto.

REFERENCIAS

- [1] Inicial nombre. Felix SS. Advances in shrimp aquaculture management. India: Daya Publishing House; 2009.].
- [2] R. M. Robertson CE. Australian prawn farming manual: Health management for profit; 2006. link: <http://era.daf.qld.gov.au/id/eprint/2055/.6>, no. 4, pp. 175-197, Dic., 1995.
- [3] Boyd CE. Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level. Aquaculture 2003;226(1-4):101-12.
- [4] Ferreira NC, Bonetti V, Seiffert WQ. Hydrological and Water Quality Indices as management tools in marine shrimp culture. Aquaculture 2011;318(3-4):425-33.
- [5] Boyd CE, Tucker CS. Pond aquaculture water quality management. Boston: Kluwer Academic Publishers; 1998.
- [6] Boyd, C.E.; Torrans, E.L.; Tucker, C.S. Dissolved oxygen and aeration in ictalurid catfish aquaculture. J.World Aquac. Soc. 2018, 49, 7-70.

- [7] Null, S.E.; Mouzon, N.R.; Elmore, L.R. Dissolved oxygen, stream temperature, and fish habitat response to environmental water purchases. *J. Environ. Manag.* 2017, 197, 559–570.
- [8] Abegaz, B.W.; Datta, T.; Mahajan, S.M. Sensor technologies for the energy-water nexus—A review. *Appl. Energy* 2018, 210, 451–466.
- [9] Carpenter, J.H. The accuracy of the winkler method for dissolved oxygen analysis. *Limnol. Oceanogr.* 1965, 10, 135–140.
- [10] Tai, H.; Yang, Y.; Liu, S. A review of measurement methods of dissolved oxygen in water. In *Proceedings of the International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture*, Beijing, China, 29–30 October 2011; pp. 569–576.
- [11] Zhao, Y.; Li, S.; Li, M.F. The research about detection of dissolved oxygen in water based on C8051F040. In *Proceedings of the 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science*, Wuhan, China, 19–20 December 2009.
- [12] Wilkin, R.T.; Mcneil, M.S.; Adair, C.J.; Wilson, J.T. Field measurement of dissolved oxygen: A comparison of methods. *Groundw. Monit. Remediat.* 2001, 21, 124–132.
- [13] Trivellini, N.; Barbisan, D.; Badocco, D.; Pastore, P.; Meneghesso, G.; Meneghini, M.; Zanoni, E.; Belgioioso, G.; Cenedese, A. Study and development of a fluorescence based sensor system for monitoring oxygen in wine production: The WOW project. *Sensors* 2018, 18, 1130.
- [14] Shehata, N.; Azab, M.; Kandas, I.; Meehan, K. Nano-enriched and autonomous sensing framework for dissolved oxygen. *Sensors* 2015, 15, 20193–20203.
- [15] Sa Song, D.H.; Kim, H.D.; Kim, K.C. Dissolved oxygen concentration field measurement in micro-scale water flows using PtOEP/PS film sensor. *Opt. Lasers Eng.* 2012, 50, 74–81.
- [16] Hsu, H.; Du, F.; Fang, Q.; Selvaganapathy, R.; Xu, C.Q. Development of a Miniaturized Dissolved Oxygen Sensor with Anti-Biofouling Coating for Water Monitoring. In *Meeting Abstracts*; The Electrochemical Society: Orlando, FL, USA, 2014; p. 1495.
- [17] Wang, J.; Bian, C.; Tong, J.; Sun, J.; Li, Y.; Hong, W.; Xia, S. Modification of Graphene on Ultramicroelectrode Array and Its Application in Detection of Dissolved Oxygen. *Sensors* 2015, 15, 382–393.
- [18] Staudinger, C.; Strobl, M.; Fischer, J.P.; Thar, R.; Mayr, T.; Aigner, D.; Fritzsche, E. A versatile optode system for oxygen, carbon dioxide, and pH measurements in seawater with integrated battery and logger. *Limnol. Oceanogr. Methods* 2018, 16, 459–473.
- [19] Larsen, M.; Lehner, P.; Borisov, S.M.; Klimant, I.; Fischer, J.P.; Stewart, F.J.; Glud, R.N. In situ quantification of ultra-low O₂ concentrations in oxygen minimum zones: Application of novel optodes. *Limnol. Oceanogr. Methods* 2016, 14, 784–800.
- [20] I Kim, C.S.; Park, J.; He, X. An intelligent dissolved oxygen microsensor system with electrochemically actuated fluidics. In *Proceedings of the IEEE Sensors*, Vienna, Austria, 24–27 October 2004; pp. 170–173.
- [21] Wei, Y.; Jiao, Y.; An, D.; Li, D.; Li, W.; Wei, Q. Review of dissolved oxygen detection technology: from laboratory analysis to online intelligent detection. *Sensors* 2019, 19, 3995.

BIOGRAFÍAS



ADRIÁN TINTOS GÓMEZ Profesor Investigador, Oceanólogo Químico, Maestro en Acuicultura y Dr. en Biología Marina y Acuicultura. Se le conoce por sus actividades de extensionismo acuícola y fomentar el Desarrollo Regional Sustentable y sus investigaciones en el área de acuicultura y ecotoxicología. Se desempeñó en la Universidad de Colima como profesor investigador titular en la Facultad de Ciencias Marinas (pensionado). Actualmente es PTC Titular C en la Universidad Tecnológica de Manzanillo y miembro del CA: Ingeniería y Desarrollo Tecnológico. Es Profesor Honorífico en la Universidad de Guadalajara y miembro del Núcleo Académico Básico del Programa de doctorado BEMARENA. Pertenece al SNI nivel I.



JOEL SALOME BAYLON Profesor en energías renovables, Dr. en Ingeniería Eléctrica y Maestro en Ciencias de la Electrónica opción en Automatización. Ha desarrollado diversos proyectos con la industria y publicado diversos trabajos en diferentes áreas, como la eléctrica, robótica, instrumentación, control, energías renovables y acuicultura.



JUAN ANTONIO DIAZ GOMEZ Profesor Investigador de la Universidad Tecnológica de Manzanillo. Ingeniero Químico, y posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Se le conoce por sus numerosos estudios en el área de sistemas termodinámicos en energías renovables, simulación numérica en procesos químicos, o sistemas de energías renovables. Ha desarrollado proyectos de la Secretaría de Energía enfocado al aprovechamiento de los gases de efecto invernadero, mediante reformadores de plasma, asesor de estudiantes a nivel licenciatura y posgrado, y ha publicado numerosos artículos de diversas revistas de divulgación científica.



OLVIN JOEL BARRERA MENDEZ Estudiante de Ingeniería en Energías Renovables. Desarrolla proyectos relacionados con el internet de las cosas, sistemas embebidos, instrumentación y automatización.