

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



**FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

TEMA

**“SISTEMA DE MEDICIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS DEL OXÍGENO
DISUELTO EN BIORREACTORES PARA MICROALGAS”**

AUTOR

RICHAR SANTIAGO CUASCOTA MÉNDEZ

DIRECTOR

ING. MILTON ALEJANDRO GAVILÁNEZ VILLALOBOS

Ibarra- Ecuador

2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR

DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento al Art. 144 de la ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el

Repositorio

Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL AUTOR		
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100439046-2	
APELLIDOS Y NOMBRES:	RICHAR SANTIAGO CUASCOTA MÉNDEZ	
DIRECCIÓN:	Otavalo – Imbabura	
EMAIL:	rscuascotam@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL:	0989532761
DATOS DE LA OBRA		
TÍTULO:	SISTEMA DE MEDICIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS DEL OXÍGENO DISUELTO EN BIORREACTORES PARA MICROALGAS	
AUTOR:	Richar Santiago Cuascota Méndez	
FECHA:	10-12-2020	
PROGRAMA:	PREGRADO	
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica	
DIRECTOR:	Ing. Milton Gavilanes	

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra, objeto de la presente autorización, es original y se la desarrolló sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto, la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 6 días del mes de agosto del 2021



Handwritten signature in blue ink, reading "Cuascota, Richard". Below the signature, the word "Firma" is printed in a small, black font.

Nombre: Richar Santiago Cuascota Méndez

Cédula: 100439046 - 2



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS
CERTIFICACION

En calidad de tutor del trabajo de grado "SISTEMA DE MEDICIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS DEL OXÍGENO DISUELTO EN BIORREACTORES PARA MICROALGAS", presentado por Richar Santiago Cuascota Méndez, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.
Ibarra, noviembre del 2020

Ing. Milton Gavilanez V.

TUTOR

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por la salud brindada y por darme la fuerza necesaria para llegar a culminar con éxito mis estudios.

De igual manera quiero agradecer a mi tutor el Ing. Milton Gavilánez, quien con sus conocimientos y apoyo me guio a través de las diferentes etapas de este proyecto para lograr alcanzar los resultados esperados.

De igual manera quiero agradecer a mi mama, mis hermanos y mi familia que me brindaron su apoyo y me brindaban aliento para seguir aun cuando mis ánimos decaían, en especial quiero mencionar a Lourdes Cuascota y Mayra Pujota por siempre brindarme sus palabras de apoyo, gracias por su bondad, nobleza y afecto.

De igual manera quiero agradecer a la Ing. Carla Sandoval por la ayuda prestada para la implementación del fotobiorreactor, misma que fue fundamental para el éxito de este proyecto.

Por último, quiero agradecer a todas los docentes y compañeros de la Carrea de Ingeniera en mecatrónica, que me han motivado y ayudado con sus vastos conocimientos y experiencia. En especial quiero hacer mención del Ing. Iván Iglesias y del Ing. Valencia Fernando, que me brindaron sus conocimientos para llegar a culminar este trabajo.

Richar Cuascota.

DEDICATORIA

A mi mama y mis hermanos que, a pesar de los obstáculos presentados, siempre han sabido guiarme e inculcarme valores, principios y siempre ser modelos para seguir y admirar. En especial a mi mama por siempre asumir los roles de padre y madre a la vez, no existen palabras de admiración, respeto y agradecimiento hacia mi mama para expresar lo grandiosa que es ella.

Richar Cuascota.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza la revisión de los parámetros necesarios para el diseño de un medidor de oxígeno disuelto juntamente con la variable de la temperatura, mismas que están directamente relacionadas. Este dispositivo será instalado en un fotobiorreactor el cual cumple la función de sistema de cultivo de las microalgas. El dispositivo está diseñado para realizar mediciones dentro del fotobiorreactor de forma autónoma. Las lecturas de la temperatura están en °C y las lecturas del oxígeno disuelto están en mg/L que es usado en los sistemas de cultivo de microalgas en fotobiorreactores, con este dispositivo se pretende mejorar las condiciones del sistema cultivo de las microalgas y obtener mediciones del oxígeno disuelto y de la temperatura en intervalos programados. El dispositivo cuenta con un panel de visualización, un sistema de almacenamiento, un sistema de reloj y un sistema de configuración, mediante el sistema de configuración se pueden establecer el intervalo de medición y almacenamiento de datos, la calibración del sensor de oxígeno disuelto y se puede configurar las alarmas del oxígeno disuelto y de la temperatura para un mínimo y un máximo valor además se realiza una revisión bibliográfica de la información más relevante de los conceptos que se vinculan directamente con el tema. En este trabajo además se detallan las fases del diseño del dispositivo que constan de los cálculos respectivos para la selección del sensor de oxígeno disuelto y se usa el método de matriz ponderada para la selección de los diferentes componentes del dispositivo, la selección se realiza en función de los criterios de los dispositivos de código abierto y de las necesidades del sistema adicionalmente se detallan los resultados de las pruebas de funcionamiento así como los diagramas de funcionamiento del sistema, el diagrama de flujo del programa implementado, el filtro usado, los planos mecánicos, los y los planos electrónicos.

ABSTRACT

In the present work, the necessary parameters for the design of a dissolved oxygen meter together with temperature are reviewed, these variables are directly related. This device will be installed within a photobioreactor which performs the function of a microalgae culture system. This device is designed to take measurements and carry out autonomously. The temperature readings are in °C and the dissolved oxygen readings are in mg / L, this measurement system is used in microalgae culture systems in photobioreactors, with this device aims to improve the conditions of the microalgae culture system and obtain measurements of dissolved oxygen and temperature in programmed intervals. The device has a data display, a storage system, a clock system and a configuration system, through the configuration system you can set the interval of measurement and data storage, the calibration of the dissolved oxygen sensor and the dissolved oxygen and temperature alarms can be configured for a minimum and a maximum value. In addition, a bibliographic review of the most relevant information on the concepts that are directly linked to this topic. In this work, the phases of the design of the device that consist of the respective calculations for the selection of the dissolved oxygen sensor are detailed and the weighted matrix method is used for the selection of the different components of the device, this selection is performed according to the criteria of open source devices and the needs of the system, additionally, the results of the functional tests are detailed as well as the operation diagrams of the system, the flow diagram of the implemented program, the filter used, the mechanical plans, and electronic plans.

ÍNDICE DE CONTENIDO

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	ii
CONSTANCIAS	iii
CERTIFICACION.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE ECUACIONES	xv
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xvi
CAPÍTULO I	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Objetivo específico.....	2
1.4 Justificación	3
1.5 Alcance	3
CAPÍTULO II.....	5
2 Marco teórico	5
2.1 Microalgas	5
2.2 Clasificación de microalgas	5
2.3 Sistemas de cultivos de microalgas.....	7
2.3.1 Biorreactores abiertos.....	8
2.3.2 Biorreactores cerrados.....	9
2.3.3 Partes del fotobiorreactor.....	12
2.4 Aplicaciones de las microalgas	12
2.5 Variables por monitorear y controlar en cultivos de microalgas.....	14
2.5.1 Luz	14
2.5.2 Temperatura.....	14
2.5.3 PH	15
2.5.4 CO ₂ , nutrientes y agua	15
2.5.5 Oxígeno disuelto.....	15

2.5.6	Agitación y desgasificación.....	16
2.6	Factores que afectan la concentración de oxígeno disuelto.....	16
2.6.1	Fotosíntesis	17
2.6.2	Presión atmosférica, salinidad y temperatura	18
2.6.3	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	20
2.6.4	Demanda química de oxígeno (DQO).....	21
2.7	Efecto de sobresaturación de OD en los fotobiorreactores.....	22
2.7.1	Fotorrespiración	22
2.7.2	Fotoinhibición.....	22
2.7.3	Radicales de oxígeno	22
2.8	Unidades de medición del OD y temperatura.....	23
2.9	Métodos de medición del OD	24
2.9.1	Método yodo métrico	24
2.9.2	Métodos electroquímicos	24
2.9.2.1	Sensores galvánicos.....	26
2.9.2.2	Sensores polarográficos	27
2.9.3	Método de sonda óptica	28
2.10	Sistemas de software de código abierto	29
2.11	Parámetros del sistema de medición para OD.....	30
CAPÍTULO III		32
3	Diseño y construcción	32
3.1	Desarrollo del hardware.....	32
3.1.1	Diagrama de funcionamiento del dispositivo de medición.....	32
3.1.2	Selección de la tarjeta de desarrollo de código abierto.....	33
3.1.2.1	Características de placas de desarrollo de código abierto.....	34
3.1.2.2	Valoración de criterios para la selección de la tarjeta de desarrollo	34
3.1.3	Selección sensor OD	37
3.1.3.1	Características de sensores de OD	40
3.1.3.2	Valoración de criterios para la selección del sensor de OD	40
3.1.4	Selección de sensor de temperatura.....	42
3.1.4.1	Características de los sensores de temperatura	42
3.1.4.2	Valoración de criterio para la seleccionar el sensor de temperatura	43
3.2	Selección de módulos adicionales.....	44

3.3	Desarrollo de software.....	45
3.3.1	Programación de adquisición de datos de OD.....	47
3.3.1.1	Calibración sensor de OD.....	48
3.3.1.2	Tratamiento de datos del OD.....	49
3.3.2	Programación de adquisición de datos de temperatura.....	49
3.3.2.1	Calibración.....	51
3.3.2.2	Tratamiento digital de los datos del sensor de temperatura.....	51
3.3.2.3	Filtro de Kalman.....	53
3.4	Diseño diagrama PCB.....	57
CAPÍTULO IV.....		59
4	Resultados y análisis.....	59
4.1	Prueba de funcionamiento.....	59
4.1.1	Medición de DO.....	59
4.1.2	Medición de temperatura.....	60
4.1.3	Almacenamiento de datos.....	61
4.1.4	Comunicación de módulos con el microcontrolador I2C Y SPI.....	62
4.1.5	Prototipo de fotobiorreactor.....	62
4.2	Resultados obtenidos.....	63
4.2.1	Resultados de la medición del OD.....	63
4.2.2	Resultados de la medición de temperatura.....	66
4.2.3	Resultados del prototipo del fotobiorreactor.....	67
4.2.4	Costos de fabricación.....	68
CONCLUSIONES.....		70
RECOMENDACIONES.....		71
TRABAJOS FUTUROS.....		71
BIBLIOGRAFÍA.....		73
ANEXOS.....		76
Anexo A. Datasheet de Atmega 328P.....		76
Anexo B. Datasheet sensor OD atlas scientific.....		81
Anexo C. Datasheet circuito de acondicionamiento de sensor DO.....		89
Anexo D. Datasheet de sensor de temperatura Lm35.....		94
Anexo E. Dispositivo de medición, Sustancia de calibración a 0 mg/L y Electrolito.....		96
Anexo F. Interfaces del dispositivo.....		97

Anexo G. Fases de cultivo de las microalgas.....	98
Anexo H. Diagrama de conexión del sistema de medición.....	100
Anexo I. Programa implementado en Atmega328P	101
Anexo J. Manual de calibración y mantenimiento	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Estanques vs fotobiorreactor [11].....	11
Tabla 2. 2. Rangos de concentración de OD en mg/L [14]	17
Tabla 2.3. Valores de saturación del OD a diferentes Temperatura.[15]	20
Tabla 2. 4. Parámetros del sistema de medición.....	30
Tabla 3. 1. Características tarjetas desarrollo de código abierto	34
Tabla 3.2. Tabla de matriz L para determinar pesos.....	36
Tabla 3. 3. Criterio de selección de sistema de procesamiento de código abierto	37
Tabla 3. 4. Constante de Henry en Mol L ⁻¹ Bar ⁻¹ [27].....	37
Tabla 3. 5. Características de sensor de OD	40
Tabla 3. 6. Criterios usados en la selección de sensor de OD [28].....	41
Tabla 3. 7. Características sensores de temperatura	42
Tabla 3. 8. Criterios para la selección del sensor de Temperatura	43
Tabla 3. 9. Criterio de selección de módulos adicionales.....	44
Tabla 3. 10. Comandos I2C del sensor OD [28].....	47
Tabla 3. 11. Criterios para seleccionar el filtro de temperatura	52
Tabla 3. 12. Datos de temperatura corporal.....	55
Tabla 4. 1. Valores medidos del OD en el punto de calibración	59
Tabla 4. 2. Valores de medición de la temperatura corporal	60
Tabla 4. 3. Registro de mediciones en la tarjeta microSD.....	61
Tabla 4.4. Valor máximo y mínimo medidos de OD en las fases del cultivo	66
Tabla 4.5. Valor máximo y mínimo medidos de temperatura en las fases del cultivo	67
Tabla 4.6. Costo del sistema de medición	69
Tabla 4.7. Costo del sistema eléctrico	69
Tabla 4.8. Costo del prototipo de fotobiorreactor y cultivo	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Proceso fotosintético de las microalgas [6]	7
Figura 2. 2. Biorreactores abiertos [10], (a) Open ponds, (b) Raceway ponds, (c) Tanques circulares.....	9
Figura 2. 3. Biorreactores cerrados [6], fotobiorreactores (a) Columna, (b)Placa plana, (c) tubulares	11
Figura 2. 4. Fotobiorreactor tubular (a)receptor solar, (b) desgasificación [12]	12
Figura 2. 5. Sensor galvánico para DO. [22].....	26
Figura 2. 6. Sensor DO polarográfico [22].....	28
Figura 3. 1. Diagrama de funcionamiento del sistema de medición	33
Figura 3. 2. Kit de OD Atlas Scientific [28]	41
Figura 3. 3. Sensor de temperatura LM35 [29]	44
Figura 3. 4. (a) Módulos microSD, (b) Módulo RTC, (c) Modulo Oled	45
Figura 3. 5. Diagrama de flujo de la programación del sistema.....	46
Figura 3. 6. Salida lineal LM35[29]	51
Figura 3. 7. Grafica de la temperatura corporal con filtro de Kalman	56
Figura 3. 8. Diagrama de conexiones del dispositivo.....	57
Figura 3. 9. Diseño PCB.....	58
Figura 4.1. Fases de crecimiento de las microalgas [41].....	65
Figura 4.2. Mediciones del OD en las fases de crecimiento de las microalgas.....	65
Figura 4.3. Mediciones de temperatura en las fases de crecimiento de las microalgas	67
Figura 4.4. Fase inicial del cultivo de microalga.....	68

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Ecuación de fotosíntesis	18
Ecuación 2. 2. Ley de Henry para gases disueltos.....	19
Ecuación 3.1. Interpolación para constante de Henry	38
Ecuación 3. 2. Ecuación de la presión parcial del oxígeno	38
Ecuación 3. 3. Salida del sensor LM35	50
Ecuación 3. 4. Relación de conversión ADC	50
Ecuación 3. 5. Ecuación para programación del sensor lm35	50
Ecuación 3.6. Actualización de estado	53
Ecuación 3.7. Predicción de estado	54
Ecuación 3.8. Ganancia de Kalman.....	54
Ecuación 3.9. Actualización de covarianza	54
Ecuación 3.10. Predicción de covarianza	54

GLOSARIO DE TÉRMINOS

OD: Oxígeno Disuelto

LDO: Oxígeno disuelto luminiscente

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

DQO: Demanda química de oxígeno

PH: Potencial de Hidrogeno

ADC: Conversor analógico digital

CAPÍTULO I

1.1 Descripción del problema

La búsqueda de nuevas fuentes de energía, de alimento, y procesos sostenibles para una creciente población mundial ha despertado el interés científico y comercial en los cultivos de microalgas, este se ha incrementado dramáticamente en los últimos años, dado que las microalgas constituyen una fuente sostenible de biomasa para la producción de biocombustibles, medicamentos, abonos y alimento animal. Además, las microalgas pueden ser utilizadas de manera combinada para la producción de biomasa junto con el tratamiento de aguas residuales, dado que se ha demostrado la capacidad de estas en la remoción de nitrógeno, fósforo y metales tóxicos en una amplia variedad de aguas residuales, producto de la actividad humana. Por otra parte, la biomasa de microalgas contiene un alto contenido de nitrógeno lo que lo convierte en un biofertilizante de bajo costo y de gran aplicación [1].

En un cultivo de microalgas, la concentración de oxígeno disuelto, resultante de la fotosíntesis, se puede incrementar considerablemente hasta sobresaturar el medio. Esta condición provoca que el metabolismo de las microalgas cambie a fotorrespiración, para utilizar el exceso de oxígeno en el medio. Los subproductos de las reacciones para generar energía se vuelven más costosos energéticamente, lo cual afecta directamente el crecimiento algal [2].

En los biorreactores con microalgas se generan grandes cantidades de O₂ durante el proceso fotosintético; este hecho, puede suponer un problema puesto que elevados valores de O₂ pueden inhibir el proceso fotosintético que a su vez controla la asimilación del CO₂. Además, altas concentraciones de O₂ combinadas con altas dosis de radiación solar pueden generar procesos de foto oxidación que dañan las células. Para evitar estos problemas, los

biorreactores con microalgas deben evitar concentraciones de oxígeno disuelto (OD) superiores a 4 veces el valor de aire saturado. Los biorreactores con microalgas cerrados son especialmente susceptibles a la acumulación de grandes concentraciones de O₂ [3].

La acumulación del oxígeno disuelto en los cultivos de microalgas puede resultar perjudicial para estas, un sistema de monitorización del oxígeno disuelto en los cultivos de microalgas ayuda a determinar los niveles de CO₂ adecuados para este tipo de cultivos, mismo que ayudara a que su ritmo de crecimiento y generación de biomasa aumente.

1.2 Objetivo general

Implementar un sistema que realice la medición y adquisición de datos del oxígeno disuelto (OD) para biorreactores de microalgas.

1.3 Objetivo específico

- Determinar los requerimientos técnicos del sistema de medición y adquisición de datos del oxígeno disuelto y de la temperatura para biorreactores de microalgas.
- Definir el mejor método para la medición y adquisición de datos del oxígeno disuelto en biorreactores.
- Diseñar un sistema de medición y adquisición de datos del oxígeno disuelto para biorreactores de microalgas.
- Implementar un sistema de medición y adquisición de datos del oxígeno disuelto para biorreactores de microalgas.

1.4 Justificación

El calentamiento global, las altas cantidades de contaminantes que emite la utilización de combustibles fósiles durante su extracción y en su uso en sus respectivas aplicaciones, la continua demanda de mayores niveles de energía eléctrica ha hecho que las energías renovables vayan tomando fuerza, entre las energías alternativas más usadas en el mundo se encuentra la biomasa, misma que es puede ser producida por las microalgas [4].

La importancia del uso de la biomasa como fuente de producción de energía eléctrica es por la capacidad que tienen las microalgas convertir la energía proveniente de la luz en energía química, siendo cuatro veces más eficientes que las plantas y siendo estos microorganismos los de más rápido crecimiento en la tierra [5].

En los laboratorios de Biotecnología en la UTN en el área de cultivos de microalgas, los biorreactores de microalgas que son construidos de manera artesanal no disponen de un sistema que realice mediciones y almacenamiento de las variables que intervienen en el crecimiento y la producción de biomasa, además se debe recalcar que existen monitoreos de ciertas variables como el PH, temperatura, entre otros, pero no cuentan con el equipo adecuado para poder realizar las mediciones del oxígeno disuelto de manera eficiente. Para realizar mediciones en el fotobiorreactor de las variables de interés se debe exponer el fotobiorreactor al medio ambiente, esto causa que nuevas especies se alojen en el biorreactor lo cual produce una competición entre las especies por los recursos disponibles.

1.5 Alcance

Se realizará un sistema de medición y almacenamiento de datos del oxígeno disuelto y de la temperatura en fotobiorreactores con microalgas, estos datos serán almacenados en un archivo digital mismo que estará almacenado en una memoria extraíble, este sistema contará

con la capacidad de establecer dos puntos de alertas uno máximo y un mínimo del oxígeno disuelto, además este sistema realizará mediciones a intervalos de tiempo preprogramados por el usuario y poseerá visualización local de las variables medidas, así como un método de calibración, todo este sistema se realizara usando plataformas electrónicas y software de código abierto, se contará con un manual de calibración y mantenimiento.

CAPÍTULO II

2 Marco teórico

2.1 Microalgas

Las microalgas son organismos unicelulares fotosintéticos con tamaños comprendidos entre 2-200 μm y debido a que son unicelulares no tienen que producir y mantener una estructura como en las plantas convencionales, esto ayuda a que sean altamente eficientes en la fijación del CO_2 para lo cual debe usar la energía solar, con lo cual se produce biomasa con una eficiencia de hasta cuatro veces superior a la de las plantas [6].

La biomasa se define como aquella materia orgánica de origen vegetal o animal susceptible de ser aprovechada energéticamente. En general, está constituida por un 95% de carbohidratos, lignina, grasas y proteínas y un 5% de vitaminas, colorantes, aromatizantes y pequeñas moléculas. La mayoría de dichos componentes son extraíbles por diferentes rutas de transformación de la materia prima, objeto de trabajo de las biorrefinerías. [7], la diferencia principal con las macroalgas es su tamaño, su gran eficiencia en la conversión de radiación solar a biomasa y su composición celular, debido a que las macroalgas no son unicelulares y poseen una estructura. Las algas y las microalgas contribuyen aproximadamente con el 50% de la producción fotosintética de la Tierra, la mayor parte ocurriendo en los océanos [8].

2.2 Clasificación de microalgas

En la actualidad se tiene conocimiento de cerca de más de 30.000 especies de microalgas, de las cuales tan solo un centenar de estas han sido debidamente documentado y alrededor de unas decenas de estas se explotan comercialmente. [9] Debido a su gran diversidad,

existen numerosas formas de clasificación. En general las microalgas son microorganismos fotoautótrofos. No obstante, varias especies tienen la capacidad de desarrollarse empleando fuentes de materia orgánica de carbono la cual es usada como energía y fuente de carbono a la vez. [6], de acuerdo con su estrategia metabólica las microalgas pueden clasificarse en 4 grupos.

- **Fotoautótrofas**, son las microalgas que obtienen de una fuente luminosa la energía necesaria para llevar a cabo la fotosíntesis, en este proceso se fija el carbono inorgánico presente en el ambiente y se obtiene como resultado oxígeno [6].
- **Fotoheterótrofos**, las microalgas usan la energía luminosa del medio y como fuente de carbono usan a los compuestos orgánicos presentes en el medio, para llevar a cabo la fotosíntesis. No usan los electrones del agua en la fotosíntesis y por tanto no se produce oxígeno [6].
- **Mixotróficas**, las microalgas tienen la capacidad de desarrollarse tanto con fuentes de carbono inorgánico y orgánico [6].
- **Heterótrofas**, este tipo de microalgas no tiene la necesidad de usar como energía la luz, para su desarrollo generalmente usa como fuente de energía y de carbono los compuestos orgánicos, que estén en su medio [6].

El interés en el cultivo y producción de biomasa a partir de microalgas viene dado por su alta capacidad fotosintética y adecuación para crecer en todo tipo de aguas y ecosistemas [6]. En este estudio principalmente se investigará sobre las microalgas fotoautótrofas, debido a que estas pueden encontrarse en lagos y ríos cercanos y son las que realizan fotosíntesis, con lo cual se consume CO_2 del medio en el que se encuentren y se obtiene como residuo el oxígeno que es el objeto de estudio de esta obra, en la figura 2.1, se puede observar el proceso

fotosintético que es desarrollado por las microalgas para obtener oxígeno como resultado de este proceso.

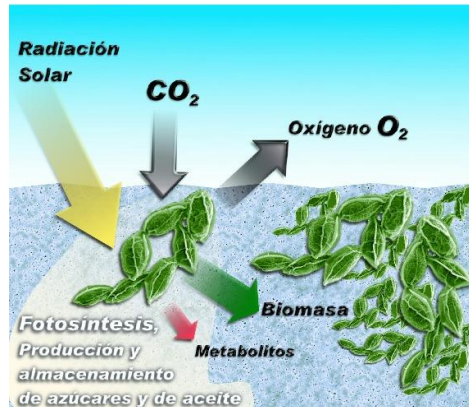


Figura 2.1. Proceso fotosintético de las microalgas [6]

Como es de esperarse, debido al gran número de tipos de microalgas que existen, cada una de las clasificaciones presentadas en esta obra presenta una subclasificación, misma que se escapa del alcance de este trabajo.

2.3 Sistemas de cultivos de microalgas

Las microalgas son organismo que se pueden encontrar principalmente en medios acuosos, entre los que se pueden destacar agua dulce, agua salada, aguas residuales de procesos industriales o de actividad humana (aguas servidas) y muy pocas especies se pueden encontrar en los diferentes tipos de suelos con poca o nada de humedad.

Las microalgas han sido cultivadas de diversas formas, en lagunas artificiales, monocultivos en estanques de cemento, bolsas plásticas o en complejos sistemas cerrados denominados fotobiorreactores. Los sistemas de cultivos pueden clasificarse según su configuración y tipo de funcionamiento [6].

2.3.1 Biorreactores abiertos

Los biorreactores abiertos son sistemas de cultivo en el cual las microalgas están al aire libre es decir están en contacto con la atmósfera, por consiguiente, estos tipos de cultivos presentan ciertas desventajas como son. Poseer una baja productividad esto se debe principalmente a la carencia de un sistema de control de las variables de temperatura, el pH o el sistema de aireación. Además, por su característica de contacto con el medio, surgen los problemas con la invasión de otros microorganismos en el medio de cultivo. En este tipo de sistemas se emplean especies robustas y de rápido crecimiento. Los biorreactores abiertos son los sistemas de cultivos de microalgas más usados a la actualidad, esto debido a su bajo costo de mantenimiento y operación con relación a los sistemas cerrados [10].

Existen tres tipos de sistemas abiertos, estos sistemas pueden observarse en la figura 2.2, a continuación, se detallan los biorreactores abiertos.

- **Open ponds**, Son sistemas de cultivos de variadas dimensiones, los cuales han sido modificados y adecuados con los recursos necesarios para el crecimiento de las microalgas, son de muy poca eficiencia y bajo coste productivo.
- **Raceway ponds**, Estos sistemas de cultivo generalmente posee un sistema de agitación y mezcla. Posee recirculación de las microalgas lo que favorece el crecimiento, son de poca profundidad.
- **Tanques circulares**, Este tipo de sistema posee ciertas desventajas con relación a las anteriores como ineficiente uso del terreno, costo elevado de su estructura, principalmente de hormigón y elevado uso de energía.



Figura 2. 2. Biorreactores abiertos [10], (a) Open ponds, (b) Raceway ponds, (c) Tanques circulares

En general estos sistemas presentan numerosos inconvenientes ya que al tratarse de grandes sistemas abiertos expuestos a la radiación solar no se pueden controlar parámetros como la irradiancia, temperatura o pH. Además, al estar abiertos están expuestos a ser contaminados por otros microorganismos que tengan mayor capacidad de crecimiento y el cultivo acabe siendo inservible [8].

2.3.2 Biorreactores cerrados

Estos sistemas comúnmente denominados fotobiorreactores, tiene como principal característica que es un ambiente totalmente aislado del exterior. Debido a su hermeticidad con el medio externo se evita la contaminación e invasión del sistema de cultivo con especies externas, se puede realizar el control de las condiciones de cultivo, en este tipo de cultivo se obtiene una mayor rentabilidad. Estos equipos incorporan sistemas de agitación, aireación, control de pH, intercambiadores de calor, adición de medio y CO₂. Normalmente, son equipos muy especializados, que se diseñan específicamente para producir una especie en concreto. Como ventajas en este tipo de sistemas de cultivo tenemos una alta productividad, la posibilidad de producir de forma continua, tener un control total del crecimiento de las microalgas y una amplia área iluminada [3], [8].

Existen 3 tipos de sistemas cerrados, en la figura 2.3 se puede apreciar estos sistemas y a continuación se detallan los diferentes fotobiorreactores.

- **Fotobiorreactor de columna**, Este tipo de fotobiorreactores cerrados, consisten en una estructura transparente cilíndrica con diámetros comprendidos entre 5-50 centímetros y de 1 a 3 metros de altura, además posee un sistema de burbujeo. Para realizar la agitación, se burbujea aire desde el fondo. A través de esta corriente de aireación se produce la retirada del O₂ y se aporta CO₂ al sistema de cultivo [10].
- **Fotobiorreactor de placas planas**, este tipo de fotobiorreactores, se conocen además como Flat Plat Reactors poseen un diseño simple que busca un uso eficiente de la luz. Este tipo de fotobiorreactores están formados por dos láminas de materiales transparentes, generalmente de plástico, entre las que se agita el cultivo mediante sistemas mecánicos o neumáticos. La introducción de CO₂ se realiza por la parte inferior del panel. El espacio entre las láminas está comprendido entre 1 y 20 centímetros, y su altura puede ser de hasta los 2 metros [10].
- **Fotobiorreactor tubular**, Este tipo de fotobiorreactores son los más sofisticados y especializados, estos fotobiorreactores tienen un alto coste de construcción. Son los más adecuados para los cultivos ubicados en el exterior, ya que tienen una alta relación entre el área iluminada y el volumen del reactor. La transferencia de materia y el grado de agitación en este tipo de fotobiorreactores son limitados, esto provoca que se produzcan altas concentraciones de O₂. También existen problemas de fotoinhibición, ya que si no hay un buen grado de mezcla las células de la superficie reciben grandes cantidades de luz, mientras que las que están situadas en el interior no les llega la suficiente [10].

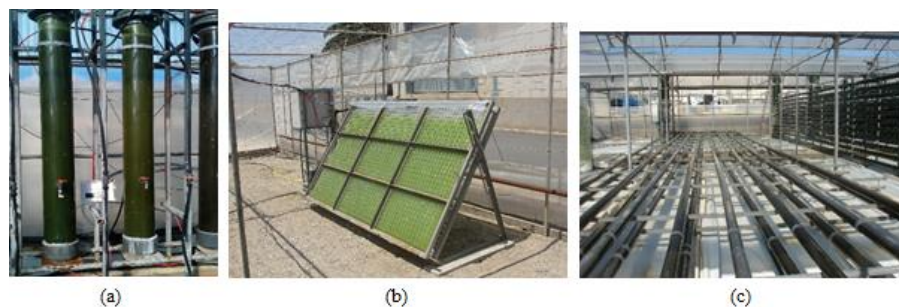


Figura 2. 3. Biorreactores cerrados [6], fotobiorreactores (a) Columna, (b)Placa plana, (c) tubulares

En general estos fotobiorreactores presentan una alta productividad lo cual se da por el incremento de la actividad fotosintética dando como resultado altas concentraciones de O_2 , sus aplicaciones comunes están enfocadas a la obtención de productos para la industria de alimentos y farmacéutica.

En la tabla 2.1 se puede observar una comparación entre los biorreactores abiertos y los biorreactores cerrados. Se puede observar que se obtiene mejores resultados en los fotobiorreactores, aunque su costo de construcción es mayor al de los biorreactores abiertos.

Tabla 2. 1 Estanques vs fotobiorreactor

	Estanques	FBRs
Capacidad de fijación CO_2	Baja	Alta
Productividad biomasa	Baja	Alta
Velocidad de crecimiento	Baja	Alta
Riesgo de contaminación	Extremadamente alto	Bajo
Pérdidas por evaporación	Altas	Bajas
Eficiencia de fotosíntesis	Baja	Alta
Área superficial	Baja	Extremadamente alta
Control del proceso	Difícil	Fácil
Coste de operación	Bajo	Alto
Escalado	Fácil	Difícil

Nota. Se muestra una comparación de los estanques de cultivos de microalgas y los fotobiorreactores [11]

2.3.3 Partes del fotobiorreactor

Generalmente los fotobiorreactores están constituidos por dos partes, aunque en sistemas más complejos poseen sistemas de control de temperatura, pH, entre otros.

- Captador. Es la estructura que capta la energía solar, está constituido de un material transparente que permita el paso de los fotones, los cuales posteriormente son usados por las microalgas para realizar la fotosíntesis [10].
- Aireación o desgasificador. En función del tipo de fotobiorreactor se utiliza una bomba de neumática o una bomba de aire o agua que permita la introducción de los nutrientes necesarios para el desarrollo de las microalgas y que permita la extracción del oxígeno presente en el medio, resultado de los procesos fotosintéticos [10], [12].

En la figura 2.4 se puede observar las partes de un fotobiorreactor tubular.

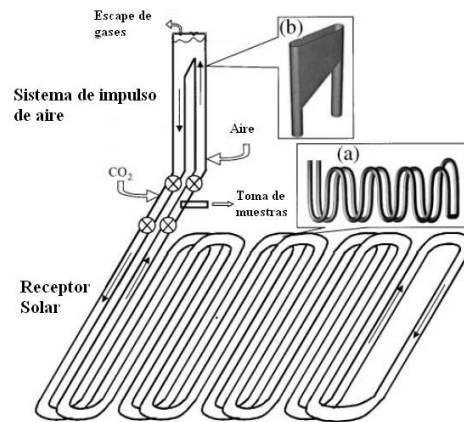


Figura 2. 4. Fotobiorreactor tubular (a)receptor solar, (b) desgasificación [12]

2.4 Aplicaciones de las microalgas

Las microalgas se pueden usar en diferentes aplicaciones, como pueden ser:

- **Usos energéticos.** - se puede usar las microalgas para obtener biocombustibles como pueden ser, Biodiesel, Bioetanol, como materia para combustión para obtener electricidad. La mayor parte de las microalgas para usos energéticos son cultivadas en fotobiorreactores abiertos.
- **Alimento animal.** - las microalgas se usan como suplemento alimenticio para ciertos animales, cabe destacar que se han investigado muchas especies de microalgas para este tipo de aplicaciones y solo unas cuantas se han utilizado dentro de la acuicultura, siendo usadas estas como aditivos alimenticios para moluscos y como harina de pescado [13]. Esto se da principalmente por su composición nutricional.
- **Productos farmacéuticos.** - las microalgas son ricas en compuestos biológicamente activos, que pueden usarse para el desarrollo farmacéutico y nutracéutico. Las microalgas tienen la capacidad de producir toxinas que pueden usarse para aplicaciones de farmacéuticas. Se sabe que las cianobacterias producen metabolitos extracelulares e intracelulares, que poseen propiedades antifúngicas, antibacterianas y antivirales [13].
- **Suplemento alimenticio.** – actualmente se están usando microalgas para la producción de ciertos suplementos alimenticios, las microalgas poseen fuentes de alto valor como son, aminoácidos, ácidos grasos, vitaminas, entre otros [13].
- **Biorremediación.** – algunas fábricas han optado por usar microalgas para limpiar la contaminación de CO₂ que se generan en los diferentes procesos, las salidas de las chimeneas de CO₂, se unen a los fotobiorreactores. Otra aplicación importante

es la eliminación de metales pesados de aguas servidas y residuales de las industrias mineras, la biomasa resultante se usa como biofertilizante [13].

2.5 Variables por monitorear y controlar en cultivos de microalgas

Existen varios factores que influyen en el desarrollo de las microalgas, se debe de monitorear y controlar continuamente estos factores, para obtener las condiciones óptimas de desarrollo de las microalgas, algunos de estos factores se presentan a continuación:

2.5.1 Luz

En las microalgas fotoautótrofas es muy importante la luz pues estas especies usan la energía solar para la realización de la fotosíntesis, la fuente de luz puede ser natural o artificial, Para que se produzca el crecimiento de las microalgas de forma eficiente, la longitud de onda de la radiación que llega al medio ha de estar entre los 350 y los 700 nm. La radiación comprendida entre estas longitudes de onda se conoce como radiación fotosintéticamente activa (PAR) y corresponde a un aprovechamiento del 42 % de la radiación incidente total [10]. La intensidad lumínica, siempre que no se llegue a la fotoinhibición, determina la tasa de crecimiento de las microalgas.

2.5.2 Temperatura

La producción de las microalgas tiene una relación directamente proporcional con la temperatura del sistema de cultivo hasta llegar a un valor óptimo de crecimiento. La temperatura óptima de crecimiento varía de una especie a otra. En términos generales esta temperatura se encuentra entre los 20°C y los 30°C. no obstante, este valor puede variar dependiendo del medio de cultivo, la especie y la cepa utilizada. Comúnmente, los cultivos de microalgas toleran temperaturas de entre 16 °C y 27 °C, en donde a temperaturas menores

a 16 °C disminuyen el crecimiento, mientras que a una temperatura mayor a los 35 °C resulta en la muerte para un gran número de especies de microalgas [10].

2.5.3 PH

El valor óptimo de PH es característico de cada especie. No obstante, el rango de pH para la mayoría de los cultivos se encuentra entre 7 y 9. Fuera de este rango se tiene un descenso en la productividad [10].

2.5.4 CO₂, nutrientes y agua

El CO₂ es la fuente de carbono inorgánico necesario para el crecimiento de las microalgas, en la fotosíntesis se usa el carbono inorgánico que es transformado en carbono orgánico, convirtiéndose en biomoléculas. El carbono constituye cerca del 50% de la biomasa de las microalgas.

Para el crecimiento de las microalgas no basta con el carbono, otros nutrientes fundamentales son el nitrógeno y fósforo, es por el hecho de que en su composición se encuentra nitrógeno que se usa las microalgas como biofertilizante [10].

El agua es el medio donde se desarrollan las microalgas y además aporta electrones para que se realice la fotosíntesis.

2.5.5 Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno gaseoso que se encuentra disuelto en un medio líquido (agua). Cuando las microalgas realizan la fotosíntesis se usa carbono inorgánico, agua y otros nutrientes, fruto de esta reacción se obtiene el oxígeno molecular, en los fotobiorreactores debido a que son estructuras cerradas se acumulan altas cantidades de oxígeno, tanto que sus niveles aumentan a niveles superiores del de saturación de la

atmosfera, Estos niveles altos de oxígeno disuelto provocan una disminución de la productividad de las microalgas.

Las microalgas usan CO₂ para producir oxígeno, por tanto, los niveles de oxígeno se deben de controlar para que no sean excesivamente altos [10].

2.5.6 Agitación y desgasificación

La agitación se realiza para obtener una distribución uniforme de las microalgas en el medio de cultivo y para que exista un intercambio de posición de las microalgas y puedan aprovechar la luz solar y de esta forma reducir el estrés lumínico.

La agitación excesiva se debe evitar, porque causa daño celular por el esfuerzo cortante y turbulencias y una agitación insuficiente puede provocar sedimentación y muerte celular [10].

La desgasificación generalmente se lleva a cabo para eliminar el oxígeno presente en el medio y para introducir CO₂, generalmente se usan sistemas neumáticos y bombas de agua que ayudan a las microalgas a estar en ciclo de luz y oscuridad.

2.6 Factores que afectan la concentración de oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno en estado gaseoso que esta disuelto en el agua, este elemento es muy importante para el desarrollo de la vida marina y terrestre debido a que las personas y animales usan el oxígeno en la respiración. En la respiración se usa el oxígeno para producir energía y CO₂.

La cantidad de oxígeno disuelto en el agua nos muestra el grado de contaminación del agua. Generalmente altos niveles de OD indican una buena calidad del agua y que esta puede albergar vida, con bajos niveles de OD no se puede albergar vida [14]. En la tabla 2.2 se

puede observar los diferentes rangos de oxígeno y sus consecuencias en los hábitats acuáticos.

Tabla 2. 2. Rangos de concentración de OD en mg/L

(OD) mg/L	Condición	Consecuencia
0	Anoxia	Muerte masiva de organismos aerobios
0 – 5	Hipoxia	Desaparición de organismos y especies sensibles
5 – 8	Aceptable	OD adecuada para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos.
8 – 12	Bueno	
> 12	Sobresaturada	Sistemas en plena producción fotosintética.

Nota. Se muestra la clasificación de las condiciones de un medio acuático en función de los niveles de oxígeno [14]

Existen factores químicos y físicos que influyen en la cantidad de oxígeno disuelto que se puede disolver en el agua, a continuación, se hablan de estos.

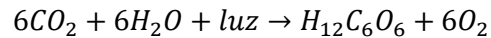
2.6.1 Fotosíntesis

Las plantas y ciertos microorganismos son capaces de realizar la fotosíntesis, mediante esta las algas y microalgas proveen al ambiente oxígeno, las microalgas son la fuente más importante de oxígeno y su medición se usa para determinar el estado de eutrofización del medio [15].

La reacción de la fotosintética en los fotobiorreactores se realiza de la siguiente manera, el CO₂ inorgánico del medio junto con las moléculas de agua que aportan electrones, en presencia de la luz como fuente de energía son usadas por la clorofila que es la encargada de transformar la energía lumínica a energía química, obteniendo como resultado glucosa que posteriormente es usada como fuente de energía por la planta. Además, se obtiene como

resultado oxígeno en forma gaseosa que en sistemas abiertos se difunde en el aire, el oxígeno resultado de la fotosíntesis queda atrapado en el fotobiorreactor debido a que es un sistema cerrado.

La reacción química de la fotosíntesis se expresa como sigue:



Ecuación 2.1. Ecuación de fotosíntesis

Como se puede observar en la reacción de la fotosíntesis lo que ocurre es la reducción de la molécula de dióxido de carbono inorgánico que es un contaminante y por la ley de la conservación de la masa como resultado se tiene el carbono como componente de la glucosa que posteriormente pasara a formar parte de la estructura celular de los organismos fotosintéticos.

El oxígeno disuelto en el agua proviene de diferentes fuentes, pero sus principales fuentes son del resultado de la fotosíntesis que aumenta los niveles de OD en el día y de la atmósfera, los niveles de oxígeno disuelto se reducen por el proceso de respiración de las plantas, generalmente las mareas o el movimiento del agua permiten que el oxígeno presente en la atmósfera sea absorbido en la masa de agua.

2.6.2 Presión atmosférica, salinidad y temperatura

Debido a que los gases se pueden disolver en diferentes medios líquidos, siendo el caso de este estudio, es necesario analizar la ley de Henry, esta ley establece los comportamientos de la solubilidad de los gases en medios líquidos tales como el CO₂ y el O₂ en el agua.

Según la ley de Henry para soluciones líquido- gas, establece que a temperatura constante la concentración de un gas disuelto en un medio líquido es directamente proporcional a la

presión barométrica del medio analizado. La ley de Henry se describe con la ecuación 2.1 [16].

$$C_i = K_h P_i$$

Ecuación 2. 2. Ley de Henry para gases disueltos

Donde K_h es la constante de Henry característico de cada gas, en $\text{mol.L}^{-1}.\text{bar}^{-1}$

C_i es la concentración del gas en mol. L^{-1} .

P_i es la presión parcial del gas en el medio en bares.

La ecuación 2.1 solo es válida siempre que la presión parcial del gas no supere 1 atm de presión y la fracción molar del gas en el líquido sea menor a 0,05.

La temperatura influye en la concentración del oxígeno disuelto debido a que al aumentar esta, las moléculas de agua se mueven con más energía, es decir que adquieren energía cinética, lo que permite a las moléculas de oxígeno disuelto salir a la atmósfera, debido a que los gases ya tienen un mayor nivel energético son estos los que escapan a la atmósfera de manera fácil.

La constante de Henry se ve afectada con el incremento de la temperatura, por lo cual los niveles de solubilidad varían junto con la temperatura, en general a menor temperatura se tiene mayor solubilidad y viceversa [16]. Es decir que en menor temperatura se obtendrá niveles de OD disueltos, mientras que a niveles de temperatura altas se tendrá menores concentraciones del OD.

En la tabla 2.3 se puede observar los niveles de saturación de OD con su correspondiente temperatura.

Tabla 2.3. Valores de saturación del OD a diferentes Temperatura.

Temperatura (°C)	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	OD (mg/L)
0	14.16	12	10.43	24	8.25
1	13.77	13	10.2	25	8.11
2	13.4	14	9.98	26	7.99
3	13.05	15	9.76	27	7.86
4	12.7	16	9.56	28	7.75
5	12.37	17	9.37	29	7.64
6	12.06	18	9.18	30	7.53
7	11.76	19	9.01	31	7.42
8	11.47	20	8.84	32	7.32
9	11.19	21	8.68	33	7.22
10	10.92	22	8.53	34	7.13
11	10.67	23	8.38	35	7.04

Nota. Se muestra los valores de saturación del oxígeno en el agua a diferentes temperaturas [15].

Otro factor para tomar en cuenta es la salinidad del agua que afecta a la solubilidad del oxígeno, por ejemplo, se tiene que en agua pura a 20 °C se tiene una concentración de OD 9.1 mg/L, mientras que en agua de mar a la misma temperatura (agua salada con minerales), se tienen una concentración de OD de 7,7 mg/L, de esto se puede deducir que los valores de saturación del oxígeno disuelto en el agua corresponden a una función de la presión barométrica, la salinidad y la temperatura. En general se tiene que a mayor salinidad menor oxígeno disuelto y viceversa.

2.6.3 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Es la cantidad de oxígeno consumido en la degradación bioquímica de la materia orgánica mediante procesos biológicos aerobios, para obtener CO₂ y H₂O. La DBO se determina

midiendo el proceso de reducción del oxígeno en una determinada muestra luego de transcurrido unos días.

Este factor se estudia debido a que en presencia de materia orgánica en descomposición en el agua, ciertas bacterias que reducen el material orgánico usan el oxígeno disuelto para remineralizar la materia orgánica, como consecuencia se tiene una disminución del oxígeno disuelto en el agua, en los fotobiorreactores se presta atención a este parámetro [14], pues los productos resultantes del cultivo de microalgas es agua y biomasa, niveles de OD bajos en los fotobiorreactores podrían indicar que se encuentra contaminado (bacterias) el medio de cultivo y como consecuencia este competiría por los recursos presentes en el medio con las microalgas, lo que conlleva a una reducción de la producción de la biomasa, además de que el agua no podría ser apto para el consumo y uso por parte de los seres vivos.

2.6.4 Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO es la cantidad de oxígeno que requieren ciertos materiales existentes en el agua, estos materiales pueden ser oxidables o no oxidables, estas sustancias deben ser de algún modo susceptibles a la oxidación mediante un proceso químico, esta oxidación se da debido a que la materia estará en constante contacto con el medio acuoso mismo que puede contener cantidades significativas de oxígeno. La DQO se verá aumentada en función de la cantidad de materia susceptible de degradación mediante oxidación química.

Este parámetro se toma en cuenta al momento de diseñar el fotobiorreactor, pues los materiales a estar en contacto con el fotobiorreactor deben ser no oxidables puesto que estarán en contacto con grandes cantidades de oxígeno.

2.7 Efecto de sobresaturación de OD en los fotobiorreactores

Las grandes cantidades de OD que se pueden encontrar en los fotobiorreactores causan problemas al sistema de cultivo y en especial a las microalgas. Como norma general, la concentración de oxígeno debe estar por debajo de un 400% de saturación de la válvula de aire de los fotobiorreactores cerrados que la posean [17], estos problemas se detallan a continuación.

2.7.1 Fotorrespiración

La fotorrespiración es el proceso inverso de la fotosíntesis, cuando el medio está sobresaturado de OD provoca que el metabolismo de las microalgas cambie a fotorrespiración, para utilizar el exceso de oxígeno en el medio. Los subproductos de las reacciones para generar energía se vuelven más costosos energéticamente, lo cual afecta directamente el crecimiento algal. En este proceso se consume oxígeno y se genera CO₂, lo cual en grandes cantidades puede resultar tóxico para el cultivo [2].

2.7.2 Fotoinhibición

La foto inhibición es el proceso de impedir la fijación de carbono por parte del enzima RuBisCo. Esta inhibición se ve favorecida por un déficit de CO₂ y por la alta radiación y temperatura. Muchas especies de microalgas no son capaces de sobrevivir en un medio sobresaturado de oxígeno más de 2 o 3 horas. El nivel de saturación varía siendo para algunas especies el 120% de saturación en el aire mientras que para otras el 200% [18]. Hay algunos estudios que aseguran haber registrado niveles de hasta el 600% de OD.

2.7.3 Radicales de oxígeno

El oxígeno es esencial para el metabolismo de los organismos aerobios, sin embargo, su participación en el metabolismo celular resulta en la producción de las especies reactivas de

oxígeno, como el anión radical superóxido, radical hidroxilo, el peróxido de hidrógeno y el oxígeno singulete. Varios agentes como los metales, luz ultravioleta, temperaturas extremas y otros contaminantes están asociados con la sobreproducción de especies tóxicas de oxígeno y daño celular en los productores primarios [19].

En cultivos de alta densidad, las microalgas pueden llegar a producir elevadas tasas de oxígeno que, en combinación con una irradiación adecuada, se puede dar la formación de radicales libres que son tóxicos para las células de los organismos [7].

2.8 Unidades de medición del OD y temperatura

Las unidades más habituales usadas para expresar las mediciones del OD son, % O₂ saturación, % aire-saturación, Torr y concentraciones en unidad de masa por volumen que son en miligramo por litro (mg/L) que es equivalente a las partes por millón (ppm) y en microgramos por litro (µg/litro) que es equivalente a (ppb). La unidad de % se puede interpretar de la siguiente manera, si a unos parámetros determinados la concentración de OD, puede ser de 20 mg/L y luego de realizar las mediciones se tiene 10 mg/L, se dice que el agua está saturada al 50% [20].

Las unidades usadas para expresar las mediciones de temperatura en los fotobiorreactores. Es la escala grados Celsius (°C), esta escala presenta una fácil conversión con el sistema de unidades Kelvin (K), que es la segunda unidad de temperatura más usada.[20], las unidades de medición de temperatura mencionadas tienen como puntos de referencias el punto de congelación (0 °C) y punto de ebullición del agua (100 °C) y el sistema de unidades Kelvin usa como punto de referencia el cero absoluto donde las moléculas no presentan energía cinética.

Como se sabe, el OD, es muy dependiente de la temperatura por tal motivo, se tiene que tomar en cuenta la temperatura de medición, porque esta variable afecta a las presiones parciales del medio. Es necesario saber la temperatura a la que se realizan las mediciones del oxígeno disuelto pues de esta forma podemos realizar una corrección en las diferentes lecturas. Algunos de los dispositivos para medir OD, poseen compensación por temperatura para asegurar lecturas más precisas [15].

2.9 Métodos de medición del OD

Los métodos de medición del OD, no son muy variados, estos métodos se usan en la piscicultura y en los sistemas de tratamiento de aguas, a continuación, se detallan los tres métodos usados hoy en día para realizar estas mediciones.

2.9.1 Método yodo métrico

Este método permite determinar la cantidad del gas disuelto del oxígeno en el agua en unidades de ppm o en mg/L usando como principio una reacción química. Se recoge una muestra que tenga el menor contacto posible con la atmósfera y se evita los cambios de temperatura para no afectar la solubilidad de los gases, la muestra se trata con sulfato manganoso (MnSO_4), hidróxido de sodio (NaOH) y yoduro de potasio, esta mezcla reacciona con el oxígeno disuelto, resultando en un compuesto estable de hidróxido mangánico $\text{MnO}(\text{OH})_2$, este nuevo compuesto en presencia de una solución acidificada de yoduro de potasio reduce el manganeso acidificado a Mn_2 junto con la liberación de yodo, esta cantidad de yodo liberado es proporcional a la concentración de oxígeno disuelto en el agua [21].

2.9.2 Métodos electroquímicos

El O_2 es una molécula altamente reactiva, tan reactiva de hecho que solo existe en nuestra atmósfera porque se produce continuamente por fotosíntesis. Reacciona como un agente

oxidante, es decir, en una reacción química recibe electrones. La mayoría de los sensores de oxígeno disuelto utilizan esta propiedad de reacciones electroquímicas para medir las concentraciones de oxígeno. Estos tipos de sensores están bien establecidos como métodos convencionales de medición. Se pueden clasificar como sensores galvánicos o polarográficos [22].

La electroquímica se basa en el principio redox (es decir, reducciones y oxidaciones). Se relaciona con la propensión de diferentes elementos y compuestos a dar o recibir electrones (en las ecuaciones de reacción, los electrones se indican con e^-). Para que se produzca este intercambio de electrones, deben tener lugar simultáneamente una oxidación y una reducción.

Una reacción, en la que una sustancia da electrones, se llama **oxidación** y una reacción, en la que una sustancia recibe electrones se llama **reducción**.

Casi todos los elementos o compuestos pueden sufrir reacciones redox. Una sustancia que participa fácilmente en reacciones redox se denomina activo redox. Los metales que se oxidan fácilmente se denominan tradicionalmente metales innobles, mientras que los metales que son más resistentes a la oxidación se denominan metales nobles. Entre otras cosas, esto significa que los metales nobles rara vez se corroen.

Las mediciones electroquímicas detectan el flujo de electrones a través de un cable entre un cátodo y un ánodo. El cátodo libera electrones porque se produce una oxidación y el ánodo los acepta en una reacción de reducción. Para evitar una reacción directa entre cátodo y ánodo, deben estar físicamente separados. Si los metales de los que están hechos el cátodo y el ánodo difieren en nobleza, entonces un potencial eléctrico se acumula por sí solo, un

proceso llamado auto polarización. Sin embargo, si la nobleza de estos dos metales es similar, se pueden polarizar aplicando un voltaje externo [22].

2.9.2.1 Sensores galvánicos

Un sensor de oxígeno galvánico contiene dos electrodos hechos de diferentes metales (de diferente nobleza) en una solución de electrolito. Los electrodos están interconectados por cables, que permiten que fluya una corriente entre ellos. Estos componentes están englobados en un eje, que está sellado por una membrana que es selectivamente permeable al oxígeno. El ánodo generalmente está hecho de zinc o plomo (en casos raros, un metal innoble diferente), mientras que el cátodo generalmente está hecho de plata u otro metal noble. El electrolito debe ser acuoso y alcalino. En la figura 2.5 se puede observar las partes de este tipo de sensores [22].

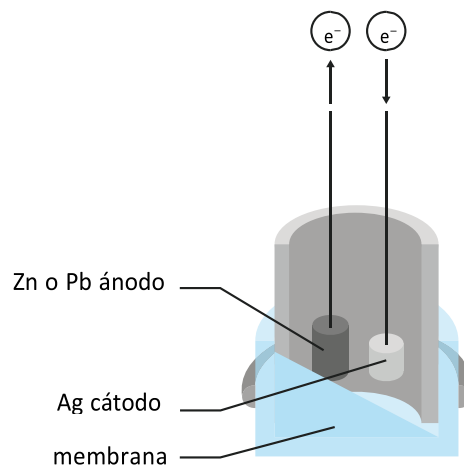


Figura 2. 5. Sensor galvánico para DO. [22]

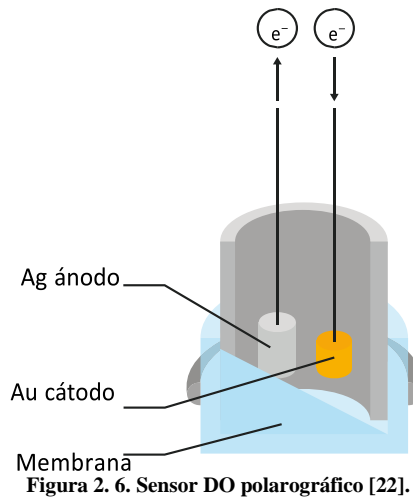
Debido a la diferencia de potencial por los dos metales de diferentes noblezas usados, el sistema se auto polariza, dado que esta es una propiedad interna del sensor OD galvánico, no se requiere esperar un tiempo para realizar las mediciones. La entrada de oxígeno al sensor permite una reacción química en la que el ánodo se oxida y se consume. Los electrones

transportados desde el ánodo al cátodo a través del cable generan una corriente que se puede medir en el medidor de OD. Cuanto más oxígeno ingresa al sistema, más corriente se genera [22].

2.9.2.2 Sensores polarográficos

De la misma manera que los sensores galvánicos los sensores polarográficos consta de un ánodo y un cátodo en una solución electrolítica. Una membrana, que es selectivamente permeable al oxígeno, lo separa de la muestra.

El ánodo está hecho de plata y el cátodo es un metal noble, como oro o platino. Estos electrodos están polarizados por un voltaje constante, proporcionado por el instrumento. Como consecuencia, el ánodo adquiere una carga positiva y el cátodo una negativa. Este proceso lleva una cierta cantidad de tiempo, razón por la cual un sensor de OD polarográfico debe polarizarse antes de la medición real. Los elementos del sensor están separados de la muestra por una membrana permeable al oxígeno. Cuando el oxígeno ingresa al sensor, las moléculas de oxígeno se reducen en el cátodo para formar iones de hidróxido. Debido a que el potencial de polarización se mantiene constante, la reacción del oxígeno aumenta la señal eléctrica. Este efecto es proporcional a la presión parcial de oxígeno en la muestra. En la figura 2.6 se visualiza las partes de un sensor polarográfico [22].



2.9.3 Método de sonda óptica

El método de sonda óptica usa el principio LDO que está basado en el fenómeno físico de la luminiscencia, que se define como la propiedad de algunos materiales de emitir luz cuando son excitados por un estímulo diferente del calor; en el caso del principio LDO, el estímulo es la luz. Si se escoge una combinación adecuada de luminóforo y longitud de onda de la luz de excitación, tanto la intensidad de la luminiscencia como el tiempo que ésta tarda en desvanecerse dependerán de la concentración de oxígeno que rodea el material. Principalmente se usa el resultado de que las moléculas de oxígeno son capaces de absorber la energía de los electrones del nivel superior y facilitar su regreso al nivel energético básico sin emitir luz. Cuanto mayor sea la concentración de oxígeno, mayor será la reducción de la intensidad de la luz roja emitida, aunque se tiene el proceso inverso en el cual se absorbe luz y se reduce la duración de la emisión de luz roja. El uso de este método es apto para uso en aguas con variaciones en su composición como son el caso de agua residuales de industrias, aguas sin sólidos, y aguas servidas, se sabe que puede producir errores en las lecturas cuando está presente dióxido de cloro en el medio. Este método usualmente tiene un punto de

calibración y posee una exactitud del 0.02 mg/L, además posee un tiempo de respuestas más lento que el método de electroquímicos en el cual se usa los electrodos membranas [23].

2.10 Sistemas de software de código abierto

El software de código abierto o de código libre es la contraparte del software propietario o de "código cerrado". El software de código cerrado está altamente protegido. Solo los propietarios del código fuente tienen el derecho legal de acceder a él. La modificación o la copia del código fuente cerrado están prohibidas por ley, y el usuario solo paga por el uso del software tal y como está; no se puede modificar para usos nuevos y no se puede compartir. El software libre no implica necesariamente que sea gratuito, sino que los usuarios pueden utilizar este de acuerdo con su conveniencia, siempre que no se incumpla las reglas del software de código abierto [24].

El movimiento del software libre se organizó en torno a la idea de la libertad del usuario: la libertad para ver, modificar y redistribuir el código fuente; es decir, poner a disposición de los usuarios y adaptar su funcionamiento de forma que satisficiera sus necesidades y a un decálogo que se debe cumplir para poder llamarse "código abierto".

- I. **Libre redistribución:** No se puede impedir la venta o distribución del programa o parte de él.
- II. **Código fuente:** el programa debe incluir el código fuente u obtenerse libremente.
- III. **Trabajos derivados:** la redistribución de modificaciones debe estar permitida bajo mismos términos del software original.
- IV. **Integridad del código fuente del autor:** las licencias pueden requerir que las modificaciones tengan nombre y número de versión diferente.
- V. **Sin discriminación de personas grupos:** las condiciones del programa no pueden discriminarse a una persona o grupo de personas.

- VI. **Sin discriminación de áreas de iniciativa:** no se puede negar a los usuarios hacer uso del programa para ningún fin como ser comercial.
- VII. **Distribución de la licencia:** deben aplicarse los mismos derechos a todo el que reciba el programa.
- VIII. **La licencia no debe ser específica de un producto:** el programa no puede licenciarse solo como parte de una distribución mayor.
- IX. **La licencia no debe restringir otro software:** la licencia no puede obligar que algún otro Software, que sea distribuido con el software abierto deba también ser de código abierto.
- X. **La licencia debe ser tecnológicamente neutral:** no puede existir ninguna disposición de la licencia que obligue al uso de una tecnología concreta.

En este trabajo se habla de sistemas de código abierto, porque en este trabajo se usa placas de desarrollo electrónico con código abierto, debido a que se puede profundizar libremente y/o modificar las placas existentes, sin que se llegue a incumplir restricciones corporativas [24].

2.11 Parámetros del sistema de medición para OD

En función de la bibliografía revisada en este trabajo se tiene ciertos parámetros que debe cumplir el sistema de medición del OD, estos parámetros se detallan en la tabla 2.4.

Tabla 2. 4. *Parámetros del sistema de medición*

	Mínima	Máxima	Precisión
Temperatura	16	35	0.5 °C
OD		400%	0.25 mg/L

Nota. Se muestra los valores de temperatura y OD que se encuentran en un fotobiorreactor (Autoría propia.)

Estos parámetros describen los puntos en los que la producción de la biomasa se ve afectada, o que puede causar la muerte de estas, estos datos se usaran como punto de partida

para poder realizar el diseño del dispositivo de medición, además se debe mencionar que las condiciones óptimas y de peligro para las diferentes especies varían, por lo cual se selecciona un rango en el que las microalgas aún siguen viviendo [6], [17].

CAPÍTULO III

3 Diseño y construcción

3.1 Desarrollo del hardware

En este apartado se procede a realizar el diseño y construcción del sistema de medición del OD y la temperatura, usando los parámetros de diseño detallados en el capítulo 2.

3.1.1 Diagrama de funcionamiento del dispositivo de medición

Luego de realizada una revisión literaria acerca de los parámetros que afectan al sistema de estudio, se determinó que el dispositivo a implementar tiene que realizar mediciones del OD y de la temperatura, la segunda variable a medir tiene una relación intrínseca, se sabe que la capacidad de disolución de un gas en un medio líquido está ligada a ciertos parámetros como es el caso de la temperatura y se procede a proponer la siguiente solución.

En la figura 3.1 se puede apreciar un primer acercamiento al funcionamiento del dispositivo, este sistema adquiere información del medio, mediante dos sensores (OD y Temperatura), posteriormente estos datos se procesan y se filtran, se usan los datos obtenidos para verificar las alarmas correspondientes a cada variable y para luego poder ser mostrados en la visualización local. Además, este sistema adquiere los datos de hora y fecha de un reloj, para determinar si el tiempo corresponde al configurado previamente para realiza la medición y almacenamiento de los datos.



Figura 3. 1. Diagrama de funcionamiento del sistema de medición (Autoría propia.)

3.1.2 Selección de la tarjeta de desarrollo de código abierto

Debido a que en este trabajo principalmente se usó sistemas de código abierto, se habla principalmente de hardware basado en estos sistemas, estos sistemas actualmente son usados en su gran mayoría de manera no industriales, pero existen ciertas variantes de este, que pueden ser usados de manera industrial, se escogió los sistemas de código abierto en este trabajo, debido a que el hardware de código abierto utiliza componentes y materiales de alta disponibilidad, procesos estandarizados, infraestructuras abiertas, contenidos sin restricciones, y herramientas de fuentes abiertas de cara a maximizar la habilidad de los individuos para materializar y usar el hardware. El hardware de fuentes abiertas da libertad de controlar la tecnología y al mismo tiempo compartir conocimientos y estimular la comercialización por medio del intercambio abierto de diseños [25]. Actualmente los hardware de código abierto tienen un gran crecimiento y aceptación por una comunidad de desarrolladores. Mismos que mantienen una constante documentación técnica de estos sistemas tanto en la parte del hardware como en el Software y mucha de esta documentación es de acceso gratuita, lo que facilitara el desarrollo del dispositivo de medición. A la fecha actual las placas de desarrollo de código abierto más difundidas y comercializadas en el mercado local son las placas Arduino y sus respectivas variantes, el minicomputador Raspberry pi y la placa de desarrollo nodeMCU.

En la tabla 3.1 se muestra las características de las principales placas de desarrollo de código abierto con su respectivo procesador.

3.1.2.1 Características de placas de desarrollo de código abierto

Tabla 3.1. Características tarjetas desarrollo de código abierto

Características	Arduino nano	Arduino uno	Arduino mega	Raspberry pi 3	NodeMCU
Microcontrolador	atmega 328	atmega 328P	atmega 2560		esp8266
Tensión de funcionamiento	5V	5V	5V	3.3V, 5V	3.6V
Voltaje de entrada	5V, 3.3V	3.3V, 5.5V	3.3V, 5V	3.3V	3.6 V
Digital pines I/O	14	14	54	26	17
Pines PWM	6	6	15	2	0
Pines de entrada analógica	8	6	16	0	1
Corriente por pines I/O	20Ma	40Ma	20mA	18Ma	12 Ma
Memoria flash	32Kb	32Kb	256kb	0	512KB
Memoria EEPROM	1Kb	1Kb	4KB	0	512Kb
Velocidad de reloj	16MHz	16MHz	16MHz	1.2GHz	160 MHz
Wifi	No	No	No	Si	Si
Temperatura de operación	-40°C a 125°C	-40°C a 85°C	-40°C a 85°C	-25°C a 80°C	-40°C a 125°C
Protocolos de red	NO	NO	No	TCP/UDP/HTTPS	TCP/UDP/HTTP
I2C	Si	Si	Si	Si	No
SPI	Si	Si	Si	Si	No

Nota. Se muestra la comparación de las características de las placas de desarrollo de código abierto (Autoría propia.)

3.1.2.2 Valoración de criterios para la selección de la tarjeta de desarrollo

La selección de la tarjeta de desarrollo se debe realizar en base a ciertos criterios que son característicos de los sistemas de código abierto y requerimientos necesarios para desarrollar

el dispositivo de manera más fácil, como puede ser la facilidad de soldadura, pues los chips SMD necesitan equipo más especializado, documentación técnica de las placas y precio, pues una de las características de los sistemas de código abierto es que son más accesibles económicamente. Esta selección se realiza usando la matriz de ponderación la cual permite cuantificar medidas cualitativas de los requerimientos del dispositivo. En esta matriz solo se realiza la evaluación de los microcontroladores pues en este trabajo se implementará solo el microcontrolador de las placas de código abierto con excepción de la Raspberry pi pues es una minicomputadora la cual cuenta con un microprocesador.

Para la determinación del peso de las especificaciones se procede a realizar una matriz L, los valores que pueden asignarse y sus recíprocos correspondientes a los criterios tienen la siguiente interpretación [26]:

- 10: El criterio de columna es mucho más importante que el criterio de fila
- 5: El criterio de columna es más importante que el criterio fila.
- 1: Ambos criterios son igual de importantes.
- 0.2: El criterio de columna es menos importante que el criterio de fila.
- 0.1: El criterio de columna es mucho menos importante que el criterio de fila.

En la tabla 3.2 se puede observar los pesos correspondientes de los criterios correspondientes, este método se usa posteriormente para determinar los pesos de los criterios para la selección de los componentes restantes.

Tabla 3.2. *Tabla de matriz L para determinar pesos*

	Módulos compatibles	Pines	Memoria	Doc. técnica	Librerías	Fácil soldar	Costo	Total	Peso relativo
Módulos compatibles	0	10	5	1	1	5	1	23	0.227
Pines	0.1	0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.9	0.009
Memoria	0.2	5	0	0.2	0.2	1	1	7.6	0.075
Documentación técnica	1	10	5	0	1	5	5	27	0.266
Librerías	1	10	5	1	0	5	5	27	0.266
Fácil soldar	0.2	5	1	0.2	0.2	0	1	7.6	0.075
Costo	1	5	1	0.2	0.2	1	0	8.4	0.083
								101.5	1

Nota. Se determina los pesos de las características de las placas de desarrollo de código abierto (Autoría propia.)

Una vez obtenido los pesos para los criterios, estos valores son usados en la matriz de ponderación para poder determinar cuál es la mejor opción de los sistemas analizados. En la tabla 3.3 se observa que la opción que mejor cumple las características necesarias es el atmega 328P, esta opción obtuvo el puntaje de 91% que es el más alto de todas las opciones contempladas. Aunque las demás opciones que son variantes de la placa Arduino obtuvieron puntajes muy cercanos. Pero estas opciones se descartan debido a que en este trabajo se pretende usar solo el microcontrolador y no la placa de desarrollo completa.

Tabla 3. 3. Criterio de selección de sistema de procesamiento de código abierto

Especificaciones	Peso	Atmega 328	Atmega 328P	Atmega 2560	Raspberry pi 3	NodeMCU esp8266
Módulos compatibles	0.23	10	10	9	7	7
Pines digitales y analógicos	0.01	9	9	10	10	10
Memoria flash y EEPROM	0.07	7	7	8	0	10
Documentación técnica	0.27	9	9	9	9	6
Librerías	0.27	9	9	10	8	6
Fácil soldar	0.07	5	9	5	0	5
Costo	0.08	9	9	6	4	7
Total, puntos	10.00	8.78	9.08	8.65	6.53	6.57
Porcentaje alcanzado		88%	91%	87%	65%	66%

Nota. Se realiza la selección de la placa de desarrollo de código abierto en función de los pesos (Autoría propia.)

3.1.3 Selección sensor OD

Para realizar la selección del sensor de OD, se debe saber los rangos máximos a medir por el dispositivo, usando los valores de la tabla 3.4 en la que se muestra la constante de saturación del oxígeno en el agua a diferentes temperaturas se procede a realizar los cálculos de estos valores.

Tabla 3. 4. Constante de Henry en Mol L⁻¹ Bar⁻¹

T (°C)	O ₂
10	1.7 x10 ⁻³
15	1.52 x10 ⁻³
20	1.38 x10 ⁻³
25	1.26 x10 ⁻³
30	1.16 x10 ⁻³
35	1.09 x10 ⁻³
40	1.03x10 ⁻³
50	9.32x10 ⁻⁴

Nota. Se muestra las constantes de saturación del oxígeno a diferentes temperaturas [27].

Usando los valores de la tabla 2.4 como punto de partida y sabiendo que tenemos una mayor concentración de OD a menores temperaturas se procede a calcular la constante de saturación del OD, correspondiente a 16°C. En la tabla 3.4 no se tiene los constante de saturación a 16°C por lo que se procede a realizar una interpolación para determinar este valor.

$$\frac{X_2 - X_1}{X_3 - X_1} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_3 - Y_1}$$

Ecuación 3.1. Interpolación para contante de Henry

$$\frac{16 - 15}{20 - 15} = \frac{K - 1.52 \times 10^{-3}}{1.38 \times 10^{-3} - 1.52 \times 10^{-3}}$$

Una vez realizada la interpolación obtenemos que $K_i = 1.49 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ para una temperatura de 16°C. Una vez obtenida la constante de Henry para 16 °C, procedemos a calcular la presión parcial del oxígeno.

Se sabe que la atmósfera se encuentra compuesta por 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de otros gases [27]. La presión parcial del oxígeno en la atmósfera se calcula usando la ecuación 3.2, esta presión parcial se encuentra multiplicando el valor de la presión atmosférica por el porcentaje del gas analizado (O_2), teniendo en cuenta que la presión de la atmósfera es 1.01325 bar tenemos como resultado:

$$P_i = P_{atm} * \%O_2$$

Ecuación 3. 2. Ecuación de la presión parcial del oxígeno

$$P_i = 1.01325 \text{ bar} * 0.21 = 0.2128 \text{ bar}$$

Una vez obtenido la presión parcial del gas, se usa la ecuación 2.2 para obtener el valor de saturación del oxígeno en el agua a 16°C.

$$C_i = K_h P_i$$

Ecuación 2.2. Ley de Henry para gases disueltos

$$C_i = 1.49 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1} \text{ bar}^{-1} * 0.2128 \text{ bar} = 3.17 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

Se debe realizar una conversión de moles de O₂ a gramos, la masa molar del oxígeno es 16 pero una molécula de oxígeno posee dos átomos, por tanto, la masa molar del oxígeno es 32g [27].

$$C_i = 3.17 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{L}} * 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 10.16 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Como los valores que se pueden alcanzar en un fotobiorreactor es de 400% de saturación de OD, multiplicamos por 4 el valor de saturación de OD anteriormente encontrado.

$$C_i = 4 * 10.16 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 40.67 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Finalmente, el valor obtenido de 40.67 mg/L de OD, se usa como requerimiento para poder seleccionar el sensor de OD.

A continuación, en la tabla 3.5 se puede ver los sensores de OD compatibles con plataformas de código abierto y sus respectivas características.

3.1.3.1 Características de sensores de OD

Tabla 3. 5. Características de sensor de OD

Especificaciones	Atlas scientific OD probe	Sensor Analógico de Oxígeno Disuelto SEN0237-A	Dissolved Oxygen Probe Boekel
Rango de medición	0.01-100 mg/L	0-20 mg/L	0.01-100 mg/L
Voltaje de operación	3.3V, 5V	3.3V, 5V	5V
Exactitud	+/- 0.05 mg/L		0.02 mg/L
Tiempo de respuesta	1 s	90 s	0.3 s
Tiempo de vida membrana	2 años	6 meses	1 año
Cambio electrolito	si es necesario	1 vez mes	si es necesario
Puntos de calibración	1 o 2 puntos	1 o 2 puntos	2 puntos
Compensación de salinidad y temperatura	Si	No	No
Protocolo comunicación	UART, I2C	No	No
Conector sonda	BNC	BNC	BNC
Costo	240	180	275
Galvánica	Si	Si	

Nota. Se muestra la comparación de las características de los sensores de OD (Autoría propia.)

3.1.3.2 Valoración de criterios para la selección del sensor de OD

Como se mencionó anteriormente para la selección del sensor se evaluarán ciertos parámetros característicos de los sistemas de código abierto y requerimientos necesarios para desarrollar el dispositivo, como puede ser el rango de funcionamiento, la documentación del dispositivo, la forma de calibración y el tiempo de mantenimiento.

Una vez obtenidos los pesos de las especificaciones usando la matriz L, se procede a realizar el cálculo del porcentaje que alcanza cada alternativa.

Tabla 3. 6. Criterios usados en la selección de sensor de OD

Especificaciones	Peso	atlas scientific OD probe	Sensor Analógico de OD SEN0237-A	Dissolved Oxygen Probe Boekel
Rango de funcionamiento	0.162	10	7	10
Tiempo de respuesta	0.009	8	5	10
Incluye módulos dependientes	0.097	7	10	0
Incluye solución calibración	0.103	10	5	0
Puntos de calibración	0.065	10	10	5
Documentación técnica	0.191	9	8	8
Disponibilidad	0.178	0	0	0
Costo	0.058	5	10	5
Mantenimiento	0.137	8	5	10
Total	10.0	7.15	6.11	5.22
Porcentaje alcanzado		71.5%	61.1%	52.2%

Nota. Se realiza la selección del sensor de OD en función de los pesos (Autoría propia.)

En la tabla 3.6 se puede observar que los resultados obtenidos según la matriz de ponderación para el sensor de OD del fabricante Atlas Scientific alcanzo el puntaje más alto que corresponde al 71.5%, aunque este no es el sensor más económico, este sensor brinda ciertas facilidades de operación, mantenimiento, rango de medición y documentación que ayuda a agilizar el desarrollo del proyecto. El kit de este sensor se muestra en la figura 3.2.

**Figura 3. 2.** Kit de OD Atlas Scientific [28]

3.1.4 Selección de sensor de temperatura

Este sensor ayuda a medir la temperatura en un medio acuoso que es usado en los fotobiorreactores, existen muchos sensores de temperatura que son compatibles con los sistemas de código abierto, pero no todos tienen la capacidad de medir temperatura en un medio líquido y que presenten una salida lineal del fenómeno medido, es por este hecho que en este trabajo analizaremos aquellos sensores de temperatura que posean un termo pozo y que presente una salida lineal, debido a que esta última ayuda a analizar los datos de la temperatura de manera más rápida.

En la tabla 3.7 se aprecia algunos de los sensores de temperatura que cumplen estas características.

3.1.4.1 Características de los sensores de temperatura

Tabla 3. 7. *Características sensores de temperatura*

Especificaciones	LM35	DS18B20	Termocupla Tipo K
Rango de medición	-55, 150°C	-55, 125°C	0-1024°C
Voltaje de operación	4-30V	3.3-5V	3.3-5V
Precisión	0.5°C	0.5 °C	1.5°C
Necesita calibración	No	No	No
Salida lineal	Si	No	Si
Consumo corriente	60 μ A	4 mA	1.5 μ A
Costo	3.5	4	9

Nota. Se muestra la comparación de las características de los sensores de temperatura (Autoría propia.)

3.1.4.2 Valoración de criterio para la seleccionar el sensor de temperatura

Para la selección del sensor de temperatura se evalúan criterios que define al sensor como un elemento fácil de implementar operar y principalmente debe tener el rango de medición adecuado. No se debe obviar características como la precisión pues valores muy alejados de la realidad no servirían para determinar relaciones con otras variables.

Tabla 3. 8. *Criterios para la selección del sensor de Temperatura*

Especificaciones	Peso	LM35	DS18B20	Termocupla Tipo K
Rango de funcionamiento	0.15	7	8	10
Disponibilidad	0.14	10	10	10
Documentación	0.03	9	9	9
Costo	0.24	10	9	6
Precisión	0.09	7	9	6
Salida lineal	0.09	9	6	10
Fácil manejar	0.25	9	7	7
Puntos	10	8.91	8.22	7.88
Porcentaje alcanzado		89.1%	82.2%	78.8%

Nota. Se realiza la selección del sensor de temperatura en función de los pesos (Autoría propia.)

Al Analizar los datos de la tabla 3.8 se puede observar que la mejor opción de sensor de temperatura compatible con plataformas de código abierto es el LM35, este sensor presenta ciertas características extra con respecto a los demás sensores de temperatura analizados en este trabajo, estas características son, no necesita librería, no necesita elementos extras y presenta una buena relación costo beneficio. En la figura 3.3 se puede observar el sensor lm35 que posee un termo pozo.



Figura 3. 3. Sensor de temperatura LM35 [29]

3.2 Selección de módulos adicionales

Para el dispositivo de medición se tiene que determinar ciertos elementos que ayuden a cumplir con los objetivos de este trabajo, como son la visualización local, el sistema de reloj, el almacenamiento y el sistema de configuración, para la selección de estos elementos principalmente se evalúa su relación costo beneficio. Presentando como beneficio la fácil implementación, operabilidad y consumo de recursos tanto en hardware y software.

Tabla 3. 9. Criterio de selección de módulos adicionales

		Reloj		Visualización			Almacenamiento	
especificación	Pesos	RTC Ds3231	RTC Ds1302	Oled 128x30	Oled 128x64	LCD 1602	Módulo SD	módulo microSD
ocupa pines	0.33	9	7	9	9	5	7	9
Costo	0.33	8	9	8	8	10	7	9
Dificultad	0.33	9	9	9	9	6	9	9
	10	8.67	8.33	8.67	9.33	7.00	7.67	9.00
		87%	83%	87%	87%	70%	77%	90%

Nota. Se realiza la selección de los diferentes módulos a usar (Autoría propia.)

Como se puede observar en la tabla 3.9, los módulos que tienen un mayor porcentaje y los que ayudan a cumplir a alcanzar los objetivos y alcance de este trabajo son el módulo RTC Ds3231, para el sistema de Reloj, para la visualización se tiene un empate, pero por poseer una pantalla de mayor dimensión se usa la pantalla Oled 128x64 y para el sistema de almacenamiento se usa el módulo MicroSD. En la figura 3.4 se puede apreciar estos módulos.

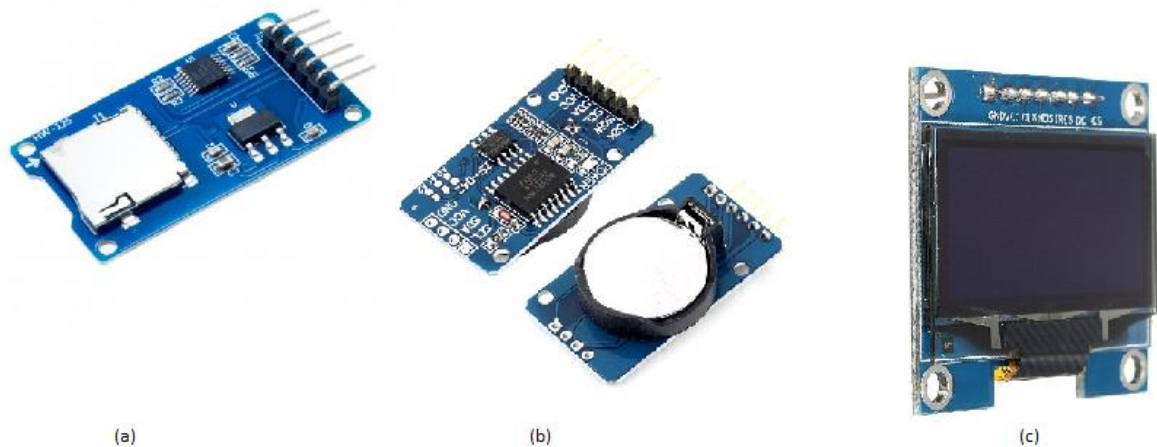


Figura 3. 4. (a) Módulos microSD, (b) Módulo RTC, (c) Modulo Oled,

3.3 Desarrollo de software

En este apartado de este trabajo se describe los diagramas de flujo de la programación a implementar, para que el dispositivo cumpla con los objetivos y alcances propuestos. En la figura 3.5 se puede observar el diagrama de flujo del algoritmo a implementar en el dispositivo.

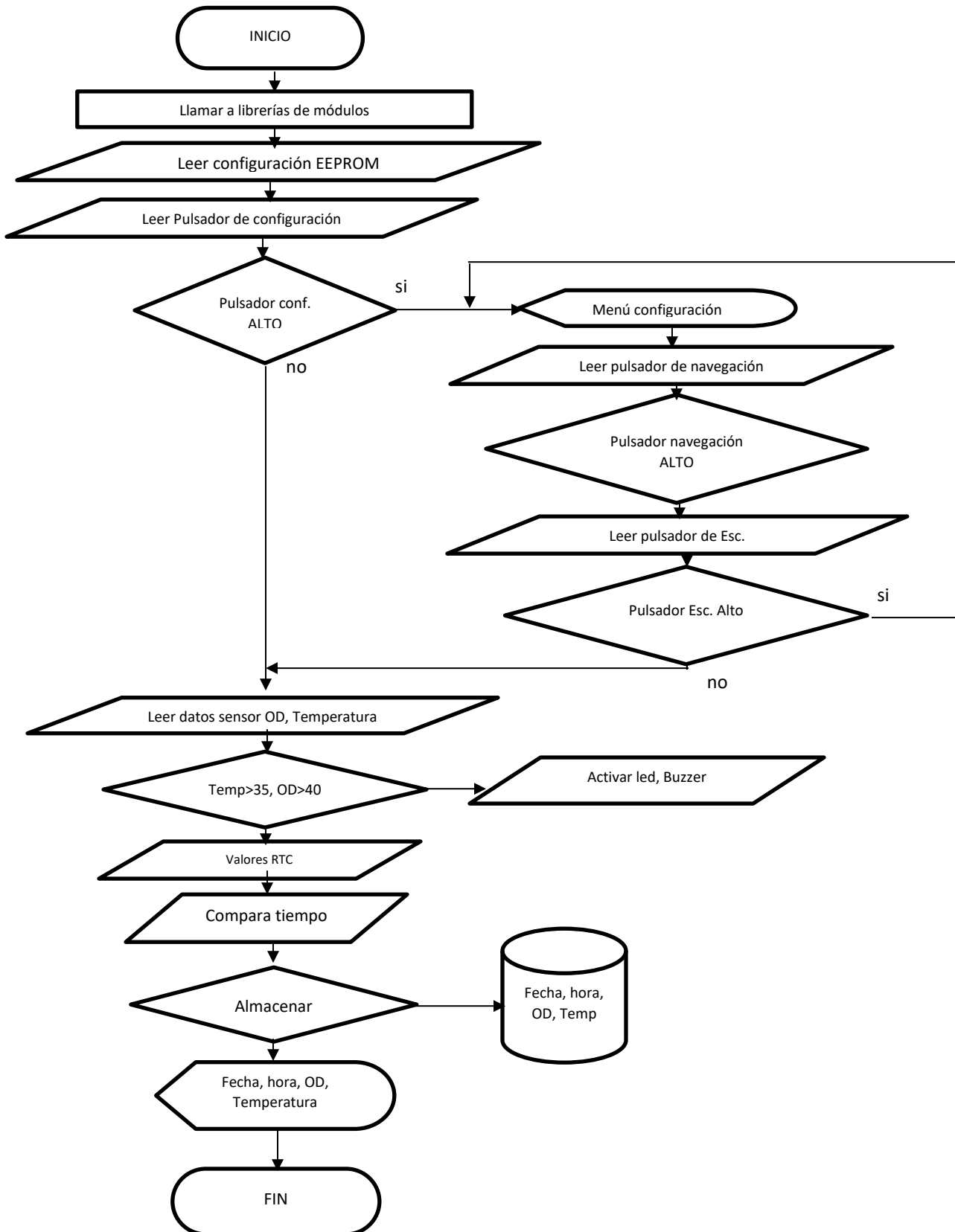


Figura 3. 5. Diagrama de flujo de la programación del sistema (Autoría propia.)

3.3.1 Programación de adquisición de datos de OD

El kit de OD de atlas scientific incluye un circuito acondicionador de las señales y que además ayuda a que se mas fácil de operar, este circuito puede ser usado en modo UART o en modo I2C, en este trabajo se usa el modo I2C debido a que presenta grandes ventajas como son el uso de un solo canal de comunicación para múltiples dispositivos, para poder operar el dispositivo se tiene que enviar la instrucción por el canal I2C el dispositivo lo interpreta y envía un resultado.

En la tabla 3.10 se muestran los comandos en I2C del dispositivo, estos comandos son cadenas ASCII o caracteres ASCII [28].

Tabla 3. 10. Comandos I2C del sensor OD

Comando	Función
Cal	Calibración
Export	exportar calibración
Factory	restablecer valores de fabrica
Import	importar calibración
P	compensación de presión
R	lectura de datos simple
S	compensación de salinidad
Sleep	modo descanso
T	compensación de temperatura

Nota. Se muestra los comandos que se pueden usar en la comunicación I2C desde la unidad de procesamiento hasta el sensor [28].

Como se puede observar en la tabla 3.10, para obtener las lecturas se tiene que enviar el comando **r**, pero antes de enviar este comando se debe establecer una comunicación entre el microcontrolador y el sensor, posteriormente se debe esperar aproximadamente 700 ms [28].

3.3.1.1 Calibración sensor de OD

Para la calibración del sensor existen dos métodos, el primer método consiste en usar la solución de calibración que viene incluido en el kit, se debe enviar el comando **cal,0** y posteriormente se debe introducir la sonda en la calibración hasta que los valores se estabilicen y sean cercanos a cero, esta calibración se usa principalmente cuando se pretende medir concentraciones de oxígeno disuelto por debajo de los 1 mg/L. El segundo método consiste en calibrar el sensor en la atmósfera con ciertas condiciones, estas son, que la presión atmosférica este en el rango de (0.97 atm- 1atm) y que la temperatura ambiente sea de 20°C [28].

En este trabajo se usa el segundo método de calibración puesto que con esta calibración se puede medir valores de OD de 1-100 mg/L. Como primer paso se debe determinar el nivel de oxígeno en el aire, para lograr esto se debe recurrir a la fórmula 2.2 y usar los datos de la tabla 3.4 de la constante de saturación del oxígeno a 20°C y con lo cual obtenemos los siguientes datos.

$$K_h = 1.38 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L} * \text{bar}}$$

$$P_i = 0.21 \text{ bar}$$

$$C_i = K_h P_i$$

Ecuación 2.2. Ley de Henry para gases disueltos

Donde K_h es la constante de Henry del oxígeno a 20°C

P_i es la presión parcial del gas de oxígeno

C_i es la concentración de oxígeno disuelto en el medio líquido

$$C_i = 1.38 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L} * \text{bar}} * 0.21 \text{ bar} = 2.87 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}^{-1}}$$

$$C_i = 2.87 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{L}} * 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 9.1 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Una vez obtenido la saturación de oxígeno de la atmósfera se envía el comando cal y se procede a realizar las lecturas del OD, mismas que deben acercarse al valor calculado.

3.3.1.2 Tratamiento de datos del OD

Debido a que el uso del acondicionador de la señal que viene incluido en el kit del sensor del OD, brinda los datos digitalizados y que dentro de su estructura contiene integrado un proceso de filtrado (esta información se lo obtuvo consultando directamente al fabricante), no es necesario incluir un sistema de filtrado para esta señal en el sistema de medición.

3.3.2 Programación de adquisición de datos de temperatura

Para la programación del sensor de temperatura se debe tener en cuenta la salida lineal que ofrece este sensor, cabe aclarar que este sensor tiene una salida analógica de 10mV/°C y un rango de medición de 2-150 °C, para poder acceder al rango de temperatura completo se necesita de componentes adicionales, en este trabajo se usa el rango por defecto, porque cumple con el rango de medición necesario.

Para poder tener estos datos de manera digital se debe conectar la salida del sensor de temperatura LM35 a un conversor analógico digital (ADC). El microcontrolador atmega328p tiene incorporado 6 pines analógicos mismos que proporcionan una precisión de 10 bits, lo que supone una precisión de la medición de +- 2.44mV [30].

Para la programación de este sensor, se debe tener en cuenta su respuesta lineal, la ecuación 3.3 representa esta recta es [29].

$$V_{out} = 10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C} \times T$$

Ecuación 3. 3. Salida del sensor LM35

La resolución del convertidor analógico digital (ADC) del atmega 328P es de 10 bits, esto implica que los valores digitales tienen un rango de 0 hasta 2^{10} que representan 0V y 5V respectivamente [30], para obtener el dato en valores de temperatura se tiene que realizar operaciones con la ecuación 3.3 y la ecuación 3.4, usando las ecuaciones antes mencionadas, obtenemos el valor correspondiente a la tensión de entrada para convertirla en valores de temperatura.

$$V_{out} = \frac{\text{Digital} * 5V}{1023}$$

Ecuación 3. 4. Relación de conversión ADC

Igualando la ecuación 3.3 y la ecuación 3.4 y despejando la temperatura obtenemos la ecuación 3.5.

$$T = \frac{\text{Digital} * 5V * 100}{1023}$$

Ecuación 3. 5. Ecuación para programación del sensor lm35

La ecuación 3.5 sirve para poder presentar los datos obtenidos por el sensor LM35 en valores que corresponden a grados centígrado.

La grafica que describe la respuesta lineal del sensor de temperatura LM35, se puede observar en la figura 3.6.

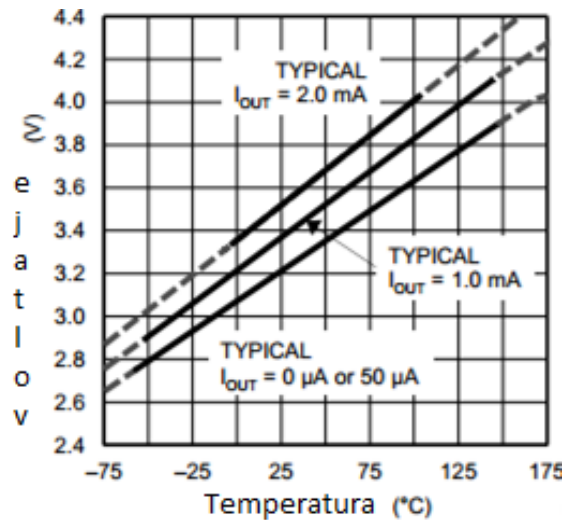


Figura 3. 6. Salida lineal LM35[29]

3.3.2.1 Calibración

El sensor de temperatura LM35 tiene como característica que viene con una calibración por defecto de fabrica este sensor y sus análogos estudiados en este trabajo, que son compatibles con los sistemas de desarrollo de código abierto cuentan con esta característica por defecto. Es por esta razón que, en el sistema de medición, para el sensor de temperatura no se requiere de una calibración externa, la calibración presente en este sensor fue desarrollado en los estados del agua como son, punto de fusión (0°C) y punto de ebullición (100°C). Es por esta razón que la salida del sensor es directamente proporcional a la temperatura en escala centígrada [29].

3.3.2.2 Tratamiento digital de los datos del sensor de temperatura

Para el tratamiento digital de los datos del sensor de temperatura se implementara un filtro, este filtro ayudara a reducir las variaciones de las lecturas del sensor de temperatura LM35, es necesario la implementación del filtro pues este sensor tiene salida analógica, por consiguiente el dispositivo es más susceptible a producir errores de lectura por el ruido presente en el medio, la mayor parte de los fenómenos que ocurren en el medio poseen

naturaleza analógica como son la voz, ondas electromagnéticas (luz solar, rayos), entre otros [31].

Para la implementación de un filtro se seleccionará un filtro digital pues la señal que se lee proveniente del sensor en el atmega328p con uno de los conversores ADC brinda una señal digital, además, algunos de estos filtros no requieren grandes recursos de procesamiento, mientras que los filtros electrónicos requieren componentes adicionales. Para realizar la selección de este filtro se la realiza usando la matriz de ponderación.

Tabla 3. 11. *Criterios para seleccionar el filtro de temperatura*

Especificaciones	pesos relativos	filtro FIR	Filtro IIR	Filtro Kalman
para funciones lineales	0.244	9	6	9
estables	0.244	9	7	8
Dificultad	0.244	7	7	7
coste computacional	0.220	7	10	9
Retroalimentación	0.049	5	9	9
Total	10	7.88	7.51	8.27
Porcentaje alcanzado		78.8%	75.1%	82.7%

Nota. En esta tabla se selecciona el filtro a usar para las mediciones de la temperatura (Autoría propia.)

En la tabla 3.11, se puede apreciar los criterios analizados para la selección del filtro para el sensor de temperatura, algunos de los criterios evaluados son el coste computacional que se relaciona con la cantidad de código y operaciones a realizar en el microcontrolador, la estabilidad, si son aptos para funciones lineales, debido a que algunos filtros solo son compatibles con señales no lineales, aun que pueden presentar ciertas variaciones que implican aumento del costo computacional para que sean compatibles con entradas lineales [32].

Como se observa en la tabla 3.11 el filtro a usar es el filtro de Kalman, debido a que en nuestra matriz de ponderación obtuvo un puntaje cercano al 83%. Mismo que se interpreta como la opción que cumple con la mayoría de los requerimientos necesarios

3.3.2.3 Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo de procesamiento de datos óptimo recursivo. Óptimo porque minimiza un criterio determinado y porque incorpora toda la información que se le suministra para determinar el filtrado. Recursivo porque no precisa mantener los datos previos, lo que facilita su implementación en sistemas de procesamiento en tiempo real. Por último, es un algoritmo que se basa en el modelo de espacio de estados de un sistema para estimar el estado futuro, y dependiendo del retraso de las muestras que se le ingresan puede cumplir la función de estimador de parámetros o únicamente de filtro. Este algoritmo usa el conocimiento del sistema, la dinámica de la instrumentación del sistema y usa herramientas estadísticas para describir el error de las mediciones y de las incertidumbres del sistema [32].

Las ecuaciones 3.6- 3.10 describen el filtro de Kalman unidimensional, el filtro de Kalman tiene 3 etapas que le ayuda a estimar los valores de las mediciones estas etapas son medición, actualización y predicción, aunque en este trabajo solo se trata el filtro de Kalman unidimensional, se debe tener en cuenta que en la mayor parte de la literatura se puede obtener un acercamiento al filtro de Kalman con n dimensiones que tiene representación matricial, en este trabajo solo usaremos el filtro de Kalman unidimensional, debido a que nosotros solo estimaremos una variable (Temperatura) [33].

$$X_n = X_{n-1} + K_n(Z_n - X_n)$$

Ecuación 3.6. Actualización de estado

$$X_{n+1} = X_n + t\dot{X}_n$$

$$\dot{X}_{n+1} = \dot{X}_n$$

Ecuación 3.7. Predicción de estado

$$K_n = \frac{P_{n-1}}{P_{n-1} + R_n}$$

Ecuación 3.8. Ganancia de Kalman

$$P_n = (1 - K_n)P_{n-1}$$

Ecuación 3.9. Actualización de covarianza

$$P_{n+1} = P_n + Q_n$$

Ecuación 3.10. Predicción de covarianza

Donde Q_n y R_n , representan la varianza del ruido del proceso y la incertidumbre de la medida respectivamente. Q_n puede tomar valores cercanos a cero para sistemas con bastante precisión y R_n se puede determinar como la desviación estándar (σ) del error de medición del dispositivo [33].

En la forma básica de conexión del sensor de temperatura LM35 solo permite medir temperaturas en el rango de 2°C a 150°C [29], como el sistema de cultivo no sobrepasa los 40°C se deberá buscar un punto de referencia entre 2°C y 40°C para determinar la eficiencia del filtro.

El punto de referencia seleccionado para probar el filtro es la temperatura corporal debido a que proporciona un punto de referencia cercano a los puntos a medir en el sistema de cultivo.

La temperatura corporal normal cambia según la persona, la edad, las actividades y el momento del día. La temperatura corporal normal promedio aceptada es generalmente de

37°C. Algunos estudios han mostrado que la temperatura corporal "normal" puede tener un amplio rango que va desde los 36.1°C hasta los 37.2°C [34].

Para determinar el punto de referencia se realiza un conjunto de mediciones a una misma persona con un termómetro digital obteniendo como resultado los datos de la tabla 3.12.

Tabla 3. 12. Datos de temperatura corporal

Número muestra	Temperatura corporal
1	36.1
2	36.2
3	35.8
4	36.3
5	36.2
6	36.4
7	36.4
8	36.4
9	36.3
10	36.1
Media	36.22

Nota. En esta tabla se observan muestras de datos de la temperatura corporal (Autoría propia.)

En la tabla 3.12 se observa que el punto de referencia a usar es de 36.22°C, mismo que se encuentre en el rango de la temperatura corporal normal, posteriormente se debe realizar la toma de datos de la temperatura corporal con el sensor LM35, utilizando estos datos se procedió a determinar los primeros datos para el filtro de Kalman, como primer dato se obtuvo la desviación estándar de las mediciones (P_{n-1}), acto seguido se calculó el error de las mediciones para posteriormente calcular su desviación estándar que es R_n .

En sistemas con sensores que tiene lecturas muy cercanas a las deseadas, Q_n puede tener valores muy bajos, en este caso usaremos un valor de 0.0001 para Q_n [33], usando los datos

obtenidos de la temperatura corporal se obtuvo un valor de 0.2412 para P_{n-1} y un valor de 0.3209 para R_n .

En la figura 3.7 se puede observar el comportamiento del filtro del Kalman, mismo que luego de un numero de actualizaciones en su valor se acerca considerablemente al valor de la temperatura corporal de referencia sin presentar grandes variaciones en su estimación, mientras que los valores del sensor sin el filtro tienden fluctuar por debajo y sobre el valor de referencia.

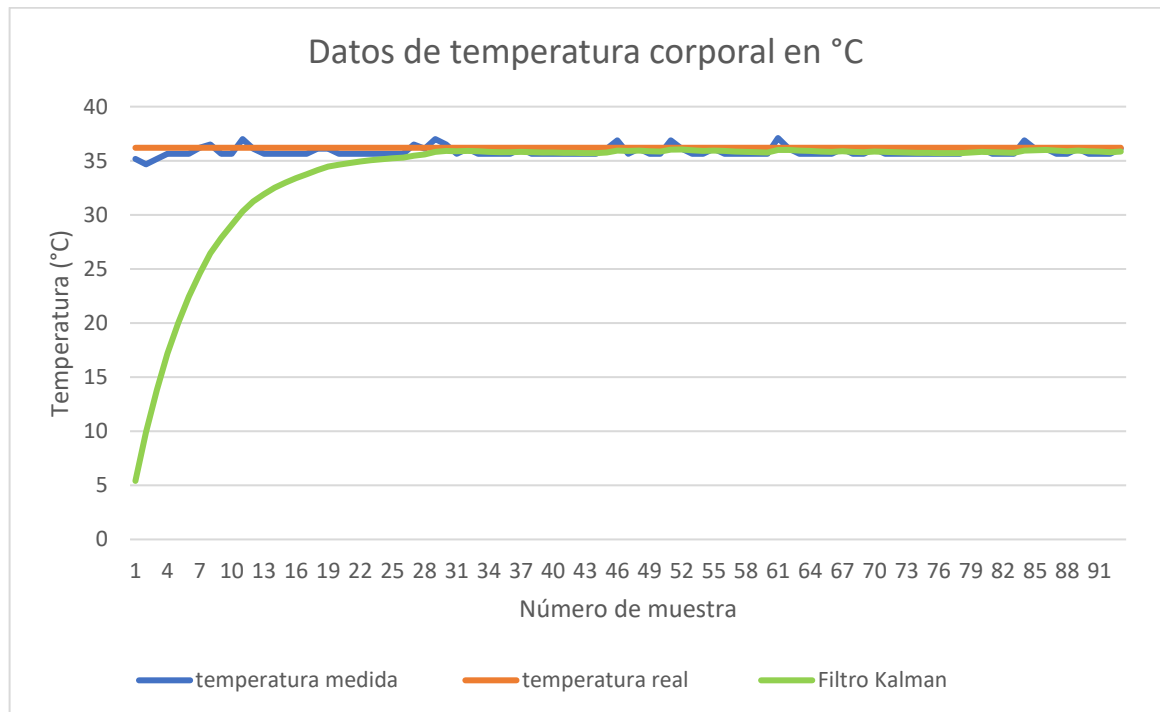


Figura 3. 7. Grafica de la temperatura corporal con filtro de Kalman (Autoría propia.)

Nuestras lecturas usando el filtro de Kalman, luego de que se alcanza valores cercanos a los de referencia son más confiables y precisas. Por estas y las razones antes expuestas en este trabajo se implementará el filtro de Kalman para las mediciones de temperatura.

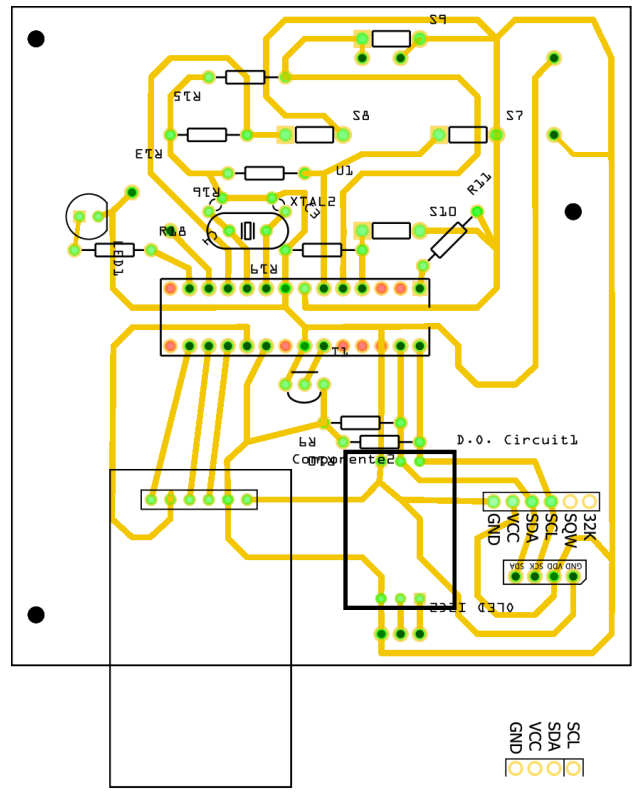


Figura 3. 9. Diseño PCB (Autoría propia.)

En la figura 3.9 se puede observar la placa PCB diseñada, los dos agujeros (Holes) de la parte superior derecha fueron realizados con el fin de colocar un micro USB hembra, misma que permite alimentar a todo el sistema.

CAPÍTULO IV

4 Resultados y análisis

Una vez finalizado con el diseño del dispositivo se procede a realizar las pruebas y análisis de funcionamiento del dispositivo.

4.1 Prueba de funcionamiento

Para esta sección se realiza las pruebas de funcionamiento del dispositivo de medición, mismo que debe cumplir con los requerimientos antes especificados.

4.1.1 Medición de DO

Para verificar la correcta toma de datos del oxígeno disuelto (OD) se usa un punto de referencia que ayuda a verificar que el sensor proporcione datos confiables, este punto de referencia es el valor de saturación del oxígeno disuelto a 20°C y a 1 atmósfera de presión, y corresponde al punto de calibración del sensor de OD [28].

Tabla 4. 1. Valores medidos del OD en el punto de calibración

Muestra N°	Valor real (mg/L)	Valor Medido (mg/L)	Error absoluto	Error relativo
1	9.1	9.19	0.09	0.99%
2	9.1	9.11	0.01	0.11%
3	9.1	9.01	0.09	0.99%
4	9.1	9.08	0.02	0.22%
5	9.1	9.09	0.01	0.11%
6	9.1	9.09	0.01	0.11%
7	9.1	9.21	0.11	1.21%
8	9.1	9.16	0.06	0.66%
9	9.1	9.09	0.01	0.11%
10	9.1	9.15	0.05	0.55%
		Media	0.05	0.51%

Nota. Se obtienen los errores relativos para determinar la confiabilidad de las mediciones del OD (Autoría propia.)

Como se muestra en la tabla 4.1, se procede a tomar diez muestras del OD en agua saturada y estos valores fueron comparados con su valor de referencia (9.1 mg/L) y se obtiene su error absoluto y su error relativo. Para determinar que los datos son aceptables se usa el error relativo porcentual como criterio de calidad de un resultado fijándose por convención que, si su valor es menor que el 1% el resultado experimental es bueno, en cambio si el valor se encuentra en el intervalo del 5% al 10% el resultado es aceptable, mientras que si el error relativo es superior al 10% el resultado es poco confiable [36].

Como se observa en la tabla 4.1, el error relativo de las mediciones es del 0.51%, con lo cual se concluye que los valores obtenidos del OD tienen una alta confiabilidad.

4.1.2 Medición de temperatura

En el proceso de verificación de las mediciones del sensor de temperatura se usa como referencia la temperatura corporal, en este trabajo este valor corresponde a 36.2°C En la tabla 4.2 se puede observar las mediciones obtenidas en este punto de referencia.

Tabla 4. 2. Valores de medición de la temperatura corporal

Muestra N°	Valor real (°C)	Valor Medido (°C)	Error absoluto	Error relativo
1	36.2	35.64	0.56	1.55%
2	36.2	36.13	0.07	0.19%
3	36.2	35.64	0.56	1.55%
4	36.2	35.64	0.56	1.55%
5	36.2	35.64	0.56	1.55%
6	36.2	35.64	0.56	1.55%
7	36.2	35.64	0.56	1.55%
8	36.2	35.64	0.56	1.55%
9	36.2	35.64	0.56	1.55%
10	36.2	36.13	0.07	0.19%
Media			0.46	1.28%

Nota. Se obtienen los errores relativos para determinar la confiabilidad de las mediciones de la temperatura (Autoría propia.)

Para la obtención del valor de referencia se toma un conjunto de muestras de la temperatura corporal con un termómetro digital y se procede a encontrar la media de los valores medidos, como se observa en la tabla 4.2, el error relativo de las mediciones de la temperatura es del 1.28%, con lo cual se concluye que los datos obtenidos tienen una buena confiabilidad.

Una vez determinado que los datos recolectados son confiables se procede a realizar mediciones de la temperatura en el agua a temperatura ambiente, con el sensor de temperatura LM35 y un termómetro digital, en este caso no se obtuvo variaciones significativas de los valores obtenidos con los dos sistemas de medición.

4.1.3 Almacenamiento de datos

Para el almacenamiento de datos se usó el formato CSV, mismo que permite almacenar los datos separados por un delimitador, siendo los más comunes la coma (","), el punto y coma (";"), este formato es compatible con las hojas de cálculo, esto permite realizar un tratamiento de datos con mayor facilidad [37]. En la tabla 4.3 se muestra los datos almacenados por el dispositivo, se usa un archivo de texto plano para el almacenamiento de las mediciones.

Tabla 4. 3. Registro de mediciones en la tarjeta microSD

Fecha	Hora	Temperatura	OD
05/11/2020	19:17:05	27.83	8.38
05/11/2020	19:17:11	29.42	8.25
05/11/2020	19:17:18	27.59	8.33
05/11/2020	19:17:25	28.81	8.38
05/11/2020	19:17:31	28.2	8.37
05/11/2020	19:32:05	28.08	8.05
05/11/2020	19:32:11	28.32	7.95

Nota. Se muestra la disposición en que se almacenan los datos en la memoria SD (Autoría propia.)

Los datos almacenados son la fecha, hora, temperatura y OD, estos datos fueron registrados en intervalos de tiempo de 15 minutos, aunque no es el único intervalo de tiempo de registro preprogramado en este dispositivo, se usa este intervalo debido a que este representa el intervalo más corto preprogramado y en el cual no existe una variación sustancial de las variables monitoreadas en la mayoría de las especies de microalgas.

4.1.4 Comunicación de módulos con el microcontrolador I2C Y SPI

Para la comunicación de los módulos del sistema se usa el protocolo I2C y el protocolo SPI, estos protocolos permiten la comunicación de un esclavo con un maestro por medio de dos o más canales de comunicación lo que facilita y reduce el tiempo de implementación del dispositivo, teniendo como principal diferencia la velocidad de transmisión de datos [38]. El circuito integrado de medición del OD usa el protocolo I2C así como otros módulos incluidos en el dispositivo como son el RTC y el OLED, mientras que el protocolo SPI es usado por el módulo de almacenamiento, el módulo de almacenamiento y el módulo OLED, presentan problemas cuando trabajan juntos debido a que las librerías necesarias para el funcionamiento del módulo OLED consume muchos recursos, en específico la memoria RAM, para solucionar este problema se tuvo que recurrir a librerías que usan menos recursos para el uso de la pantalla OLED. Para solucionar el problema antes mencionado se recurrió a las librerías SSD130Ascii y SSD1306AsciiWire [39].

4.1.5 Prototipo de fotobiorreactor

En esta etapa del proyecto se implementa un prototipo de fotobiorreactor, este prototipo se utiliza para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de medición, en este fotobiorreactor se desarrolló el cultivo de una subespecie de la microalga *Chlamydomona*, el

fotobiorreactor presenta un volumen igual a 5 Litros y se usa el tipo de microalga antes mencionada principalmente porque esta puede crecer en un medio sencillo de sales inorgánicas, utilizando la luz para proporcionar energía [40].

Estas microalgas pueden desarrollarse principalmente en estanques naturales de agua dulce o salobre, en todo tipo de suelos, en las chimeneas termales submarinas e incluso bajo la capa de hielo antártica, que al ser inducida a desarrollarse en condiciones anaerobias rompen la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno, aprovecha para su respiración el oxígeno y libera gas de hidrógeno al medio de cultivo. También pueden crecer en la oscuridad total, con una fuente de carbono alternativa, tal como acetato, es de naturaleza adaptable, esta especie de microalgas principalmente se usa para la producción de biodiesel [40].

4.2 Resultados obtenidos

En esta etapa se realiza un análisis de las mediciones del OD y la temperatura, que se obtuvo en el medio de cultivo de las microalgas.

4.2.1 Resultados de la medición del OD

Como se mencionó anteriormente el dispositivo cuenta con visualización local, en este se presentan los datos del sistema en tiempo real, pero el almacenamiento no es continuo principalmente por que los cambios en este tipo de sistemas no se producen a grandes velocidades, por este motivo se realiza el almacenamiento de las mediciones en intervalos de 15 minutos, aunque el sistema de medición posee otros tiempos alternativos de almacenamiento que pueden ser usados según las necesidades del usuario.

Luego de concluido la etapa del cultivo se procede a realizar un análisis de los resultados obtenidos por el sistema de medición.

En la figura 4.1, se observa las fases del cultivo de las microalgas, estas fases son:

- **Fase adaptación**, las microalgas son introducidas en el sistema con condiciones controladas de cultivo, en esa fase las microalgas deben adaptarse a las condiciones del sistema, por lo que no existe un incremento neto de la población.
- **Fase exponencial**, es la fase de crecimiento, en esta fase la biomasa del sistema presenta un crecimiento exponencial debido a la asimilación de nutrientes desde el medio y al proceso de reproducción.
- **Fase de declinación**, en esta fase se tiene una reducción de la biomasa presente en el sistema, esto como consecuencia de la disminución de nutrientes; por lo que el tiempo para duplicar la población aumenta.
- **Fase estacionaria**, la densidad celular, es decir la cantidad total de biomasa en el sistema se mantiene constante, no hay un aumento neto de la biomasa presente en el sistema y la tasa de crecimiento es cercana a la tasa de mortandad celular.
- **Fase de muerte**, en esta fase se tiene una mayor tasa de mortalidad con respecto a la tasa de crecimiento celular, como consecuencia de esto se tiene una reducción de la biomasa del sistema.

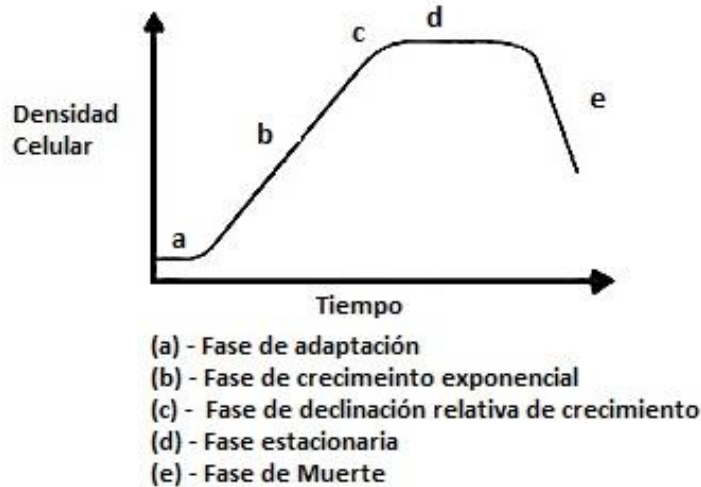


Figura 4.1. Fases de crecimiento de las microalgas [41].

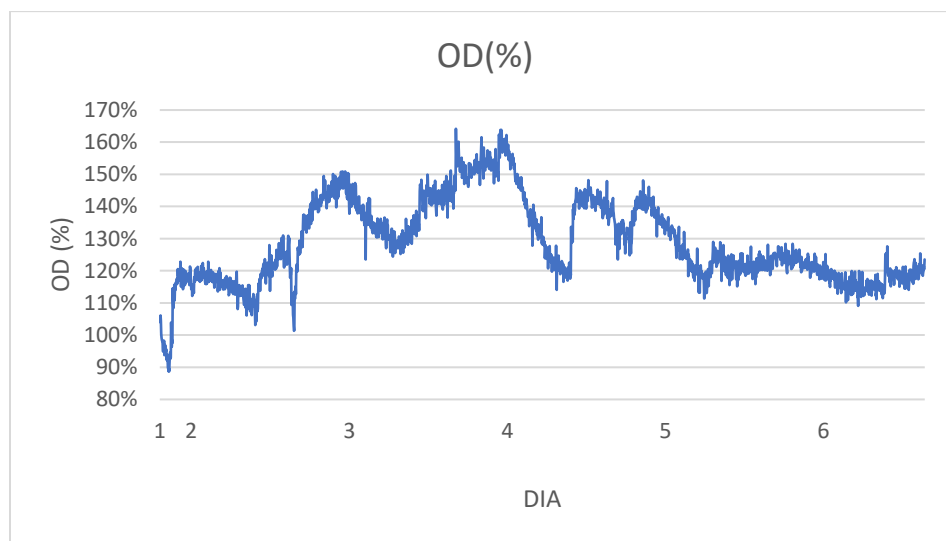


Figura 4.2. Mediciones del OD en las fases de crecimiento de las microalgas (Autoría propia.)

En la figura 4.2 se puede observar los valores obtenidos del OD en las fases del cultivo de la microalga, también se puede observar que los valores de las mediciones realizadas están dentro del rango de mediciones del dispositivo, de los datos almacenados del sistema de medición se determina los valores máximos y mínimos registrados del OD, y su respectiva equivalencia en escala porcentual, estos datos se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Valor máximo y mínimo medidos de OD en las fases del cultivo

	Máximo	Mínimo
OD	164%	89%
	12.28 mg/L	7.01 mg/L
	32.6°C	28.81 °C

Nota. Se muestra los valores críticos obtenidos del OD durante todas las fases del cultivo (Autoría propia.)

El valor mínimo registrado corresponde al inicio de la fase de adaptación (día 1) de la microalga y el valor máximo registrado corresponde al final de la fase de crecimiento exponencial (día 3).

4.2.2 Resultados de la medición de temperatura

En este apartado se realiza un análisis de los datos obtenidos de la temperatura por parte del sistema de medición, en las diferentes fases del cultivo de la microalga.

Como se observa en la figura 4.3, las mediciones de la temperatura están dentro del rango de medición del dispositivo y la mayor parte de estos valores oscilan entorno a los 31 °C que está dentro del rango de la temperatura óptima para la producción de las microalgas tal y como se estableció en la tabla 2.4.

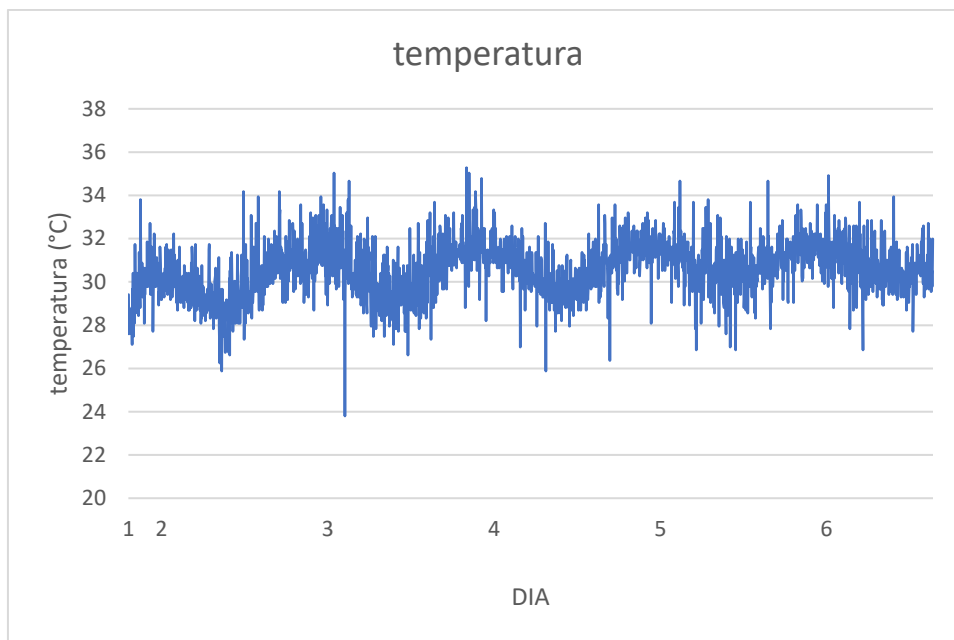


Figura 4.3. Mediciones de temperatura en las fases de crecimiento de las microalgas (Autoría propia.)

Los valores máximos registrados corresponden al final de la fase de crecimiento exponencial (día 3) y el valor mínimo registrado corresponde al inicio de la fase de crecimiento exponencial (día 3). En la tabla 4.5 se puede apreciar estos valores.

Tabla 4.5. Valor máximo y mínimo medidos de temperatura en las fases del cultivo

	Máximo	Mínimo
Temperatura (°C)	35	24
OD (mg/L)	11.79	10.51

Nota. Se muestra los valores críticos obtenidos de la temperatura durante todas las fases del cultivo (Autoría propia.)

4.2.3 Resultados del prototipo del fotobiorreactor

Como se mencionó en el apartado anterior y como se puede observar en los gráficos 4.2 y 4.3 las mediciones realizadas están dentro del rango de mediciones, con lo cual se puede establecer que el sistema de medición cumple con la función para la cual fue diseñada, en la figura 4.4 se puede observar el sistema de cultivo de la biomasa de microalgas.



Figura 4.4. Fase inicial del cultivo de microalga (Autoría propia.)

Nota. Imagen obtenida en los laboratorios de biotecnología de la UTN.

En el sistema de cultivo se usa dos fuentes de carbono como es el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y el dióxido de carbono presente en la atmósfera, el CO_2 , se introduce al sistema usando una bomba de aire, misma que cumple la función de proporcionar una fuente de carbono, además evita la sedimentación, ayuda a las microalgas a alternar en fase de luz y oscuridad para reducir el estrés lumínico y como desgasificador del sistema.

4.2.4 Costos de fabricación

A continuación, se muestra en las tablas 4.6 -4.8 los valores de los costos de los elementos utilizados en este proyecto la inversión total del sistema de medición es de 276 dólares americanos, un sistema de medición con características similares y con aplicaciones industriales o de laboratorio tiene un costo aproximado de 2678 dólares americanos.

Tabla 4.6. Costo del sistema de medición

Descripción	Unidad	Precio
Resistencias	7	0.1
Oscilador de cristal	1	0.5
Capacitores	3	0.05
Módulo RTC	1	2.9
Módulo OLED	1	7
Módulo SD	1	2
KIT de OD	1	240
Sensor LM35	1	3.5
Buzzer	1	1.25
Pulsadores	4	0.25
Carcasa	1	15
Baquelita	1	1
Acido cloruro férrico	1	1
Total		276

Nota. Se muestra el costo de los materiales usados en la construcción del dispositivo de medición (Autoría propia.)

Tabla 4.7. Costo del sistema eléctrico

Descripción	Unidad	Precio
Bomba	1	10
Fuente de 5v	1	5
Lampara de luz blanca	3	15
Total		60

Nota. Se muestra el costo de los materiales usados en el sistema eléctrico (Autoría propia.)

Tabla 4.8. Costo del prototipo de fotobiorreactor y cultivo

Descripción	Unidad	Precio
Envase de cristal de 5L	1	19
Manguera de pecera	4	0.75
Escape	1	5
Bicarbonato de sodio	1	1
Total		28

Nota. Se muestra el costo de los materiales usados para la construcción del prototipo de fotobiorreactor (Autoría propia.)

CONCLUSIONES

- Mediante el análisis de los datos obtenidos con el dispositivo de medición del OD, se determinó una correlación directa de los niveles de oxígeno disuelto y la fase en la que se encuentra el cultivo de microalgas, se obtuvieron niveles de OD de 89%, 164% y 109% en las fases de adaptación, crecimiento exponencial y fase de muerte respectivamente.
- El funcionamiento del dispositivo está de acuerdo con los parámetros técnicos determinados, los niveles críticos registrados son en la fase de adaptación con 89% de OD, esto es debido a que la tasa de reproducción es menor que la tasa de muerte y en la fase de crecimiento exponencial con 164% de OD, que es donde la biomasa se incrementa exponencialmente, de estos valores obtenidos se puede afirmar que el dispositivo cumple con las especificaciones requeridas para un fotobiorreactor.
- Los métodos para las mediciones del oxígeno disuelto estandarizados son 3, de los cuales para obtener lecturas de manera automática y realizar su almacenamiento es adecuado usar sensores ópticos o electroquímicos, actualmente los sistemas electroquímicos son los más accesibles y de mayor compatibilidad con sistemas de código abierto.
- Para los diseños de prototipos de fotobiorreactores y sistemas de medición se debe tener presente la corrosión y/o oxidación de los elementos, pues el oxígeno es un componente altamente reactivo (oxida), y se lo puede encontrar en el ambiente, debido a su continua formación ya sea por la fotosíntesis de las plantas terrestres o de las plantas marinas que en mayor porción son las microalgas.

- El diseño de este sistema permite realizar mediciones en sistemas de cultivos con diferentes variedades de microalgas, las cuales poseen diferentes factores de crecimiento dependiendo del tipo de microalga, estos factores principalmente son la temperatura y PH del medio de cultivo, de los cuales la temperatura afecta directamente a los niveles de concentración de OD.
- Los filtros para señales digitales tales como el caso del filtro de Kalman, que fue implementado en este proyecto nos ayudan a obtener lecturas de datos del sistema más confiables, además de que en sistemas unidimensionales no requieren grandes recursos del procesador.

RECOMENDACIONES

- Implementar sistemas de desgasificación en los fotobiorreactores principalmente porque el oxígeno, es un elemento altamente reactivo, lo que puede conducir a una fácil combustión de los elementos del sistema.
- Implementar sistemas de medición en los fotobiorreactores de otras variables como la radiación fotosintética activa, el aumento de la biomasa, PH y Conductividad eléctrica.

TRABAJOS FUTUROS

- Implementar sistemas automáticos de desgasificación e introducción de CO₂, mismos que ayudarían al rápido crecimiento de la biomasa.

- Implementar un sistema integrado de mediciones de las diferentes variables que afectan el ritmo de crecimiento de las microalgas.
- Implementar sistemas de control del PH, temperatura, radiación fotosintética activa y conductividad eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Braida, M. Pio Campot, E. Nervi, C. Tartaglia, “Aplicaciones del cultivo de microalgas en arquitectura sustentable”, Tesis pregrado, Universidad ORT Uruguay, Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay, 2015.
- [2] O. Montes, “Efecto de la intensidad de la luz y de la tasa de inyección de aire en el crecimiento y la productividad de la microalga *Nannochloropsis* sp., cultivada en un biorreactor”, tesis de postgrado, CICESE, Ensenada, Baja California, México, 2014.
- [3] D. Flores, “Biosensores y sensores luminiscentes para la detección de simazina en agua basados en microalgas y para la monitorización de o₂, co₂ y biomasa en cultivos microalgares”, Tesis de doctorado, Universidad complutense de Madrid, Madrid, España, 2012.
- [4] A. Hernandez, J. Labbe, “Microalgas, cultivo y beneficios”, *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, Vol. 49, pp. 157-173, 2014, <https://doi.org/fg7t>
- [5] S. Subía, J. Rubio, “Evaluación de biomasa de microalgas de la laguna Limoncocha como materia prima para la obtención de biocombustibles”, *Enfoque UTE*, V.9-N.2, pp. 106 – 116, 2018, <https://doi.org/gnpc>.
- [6] Cajamar caja Rural, ¿Qué son las microalgas? Intereses y uso, [En línea]. Available: <https://n9.cl/f334>
- [7] P. Lopez, “Diseño de un fotobiorreactor tubular para la producción de *Chlorella vulgaris*”, tesis postgrado, ETSEIB, Barcelona, España, 2016.
- [8] E. Lomas, “Construir naturaleza: el empleo de microalgas en la arquitectura sostenible”, Tesis de pregrado, UPM, Madrid, España, 2017, [En línea]. Available: <http://oa.upm.es/47523/>
- [9] M. Guamán, N. Gonzales, *Catalogo de microalgas y cianobacterias de agua dulce del Ecuador*, Corporación para la investigación Energética, Laboratorio de biotecnología Energética, Quito, Ecuador, 2016.
- [10] V Sanz, “Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes”, tesis de postgrado, ETSEIB, Barcelona, España, 2019, [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/2117/167711>.
- [11] A. Santos, Y. Gonzales, C. Sastre. “Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas”. *Anales de mecánica y electricidad*. XCI. 20-28, febrero 2014.
- [12] S. Velásquez, A. Ulate, “Diseño, construcción y puesta en marcha de un fotobiorreactor tubular para producir la microalga *Chlorella* sp”, *Ciencia y Tecnología*, vol. 30, no. 1, pp 28-49, junio 2015.
- [13] García Cubero, R. (2014). Producción de biomasa de microalgas rica en carbohidratos acoplada a la eliminación fotosintética de CO₂, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2014.

- [14] M. Quispe, “Estudio del comportamiento del oxígeno disuelto y parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la Bahía Interior de Puno”, tesis de pregrado, Universidad Wiener, Lima, Perú, 2016.
- [15] L. Avecillas, “caracterización físico-químico del estero salado entre el puente de la Avenida Kennedy y el puente 5 de junio efectuado en el periodo agosto-octubre del año 2012”, tesis de pregrado, Facultad de ingeniería química, UG, Guayaquil, Ecuador, 2014.
- [16] M. Angelini, E. Baumgartner, C. Benitez, *temas de química general*, segunda edición, buenos aires, argentina, 1995.
- [17] C. García, D. Marín, “diseño de un sistema de bombeo y de desgasificación para un fotobiorreactor utilizado en la producción de biomasa y ácidos grasos a partir de microalgas”, tesis de pregrado, UAO, Facultad de Ingeniería, Santiago de Cali, Colombia, 2011.
- [18] R. Olortegui, “microalgas verdes amarillentas- dulce acuícola con potencial de remoción de cadmio”, tesis de pregrado, Facultad de recursos naturales renovables, UNAS, Tingo María, Perú, 2015.
- [19] F. Aránguzi, H. Gaete, M. Hidalgo, G. Lobos, “Daño oxidativo en la microalga *pseudokirchneriella subcapitata* expuesta a aguas receptoras de un efluente minero en del río blanco (v región, chile)”, *Artigo*, v. 32, n. 9, p. 2417-2422, mayo, 2009 [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000900034>
- [20] M. Álamo, I. Nevares, “La medida del oxígeno en bodega”, *revista de enología 74 línea 74 física y profesional (ACENOLOGIA)*, v. 1, n 1, octubre, 2012, [En Línea]. Available: <https://n9.cl/c4qx>
- [21] *Aguas. Determinación del oxígeno disuelto*, NTE INEN 1106:2013
- [22] Guide for Dissolved Oxygen Measurements, METTLER TOLEDO, [En línea]. Available: <https://n9.cl/crfv>
- [23] M. Häck, Medida óptica de la concentración de oxígeno en el agua, HACH LANGE, 2018, [En línea]. Available: <https://n9.cl/290h4>
- [24] M. Doria, A. Del Prado, M. Haustein, Repositorios Digitales y Software Open Source, *Revista Iberoamericana de Educación en Tecnología y Tecnología en Educación*, N°1, junio, 2015, [En Línea]. Available: <https://n9.cl/s07r5>
- [25] Open Source Hardware Association [En Línea]. Available: <https://www.oshwa.org/>
- [26] “como hacer una matriz de priorización”, [En Línea]. Available: <https://n9.cl/jada>, [Ultimo acceso:20 octubre 2020]
- [27] G. Eby, *Principles of Environmental Geochemistry*, 1 st, Lowell, MA, United States, Waveland Press, 2004.
- [28] Atlas scientific environmental robotics, “Dissolved Oxygen Kit”, Kit-103DX, Datasheet, 2020, [En Línea]. Available: <https://n9.cl/v4872>
- [29] Texas Instrument, “LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors”, SNIS159H, Datasheet, 2017, [En Línea]. Available: <https://n9.cl/ep5c>

- [30] Atmel, “Atmega328P”, 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash, Datasheet, 2017, [En Línea]. Available: <https://n9.cl/r3weh>
- [31] F. Miyara, *CONVERSORES D/A Y A/D*, 2nd, Rosario, Argentina, UNR, 2004
- [32] C. Hernández, “filtro de Kalman para estimación de estados en sistemas eléctricos de potencia”, tesis de postgrado, programa de maestría y doctorado en ingeniería eléctrica – sistemas eléctricos de potencia, UNAM, México D.F., México, 2015.
- [33] “Filtro de Kalman”, [En Línea]. Available: <https://n9.cl/5ht3n>, [Ultimo acceso:25 octubre 2020]
- [34] “Temperatura corporal normal”, [En Línea]. Available: <https://n9.cl/gvsli>,
- [35] *Generic Standard on Printed Board Design, IPC- 2221B*: 2019.
- [36] M. Santo, G. Lecumberry, *El proceso de medición: Análisis y comunicación de datos experimentales*, Rio Cuarto, Argentina, Universidad Nacional de Río Cuarto, 20 5.
- [37] “33 Formatos separados por delimitadores (CSV)”, [En Línea]. Available: <https://n9.cl/15cq>, [Ultimo acceso:31 octubre 2020]
- [38] “Selección entre I2C y SPI para su proyecto”, [En Línea]. Available: <https://n9.cl/dhjj>, [Ultimo acceso:1 noviembre 2020]
- [39] “Biblioteca Arduino de solo texto para pantallas OLED SSD1306”, [En línea]. Available: <https://n9.cl/w08p5>, [Ultimo acceso:3 noviembre 2020]
- [40] “CULTIVO DE CHLAMYDOMONAS”, [En línea]. Available: <https://n9.cl/egyn>, [Ultimo acceso:5 noviembre 2020]
- [41] “Microalgas, el origen mismo de la vida”, [En línea]. Available: <https://n9.cl/ve17>, [Ultimo acceso:8 noviembre 2020]

ANEXOS

Anexo A. Datasheet de Atmega 328P

Features

- High Performance, Low Power AVR[®] 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 131 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 20 MIPS Throughput at 20 MHz
 - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
 - 4/8/16/32K Bytes of In-System Self-Programmable Flash program memory
 - 256/512/512/1K Bytes EEPROM
 - 512/1K/1K/2K Bytes Internal SRAM
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C⁽¹⁾
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
In-System Programming by On-chip Boot Program
True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
 - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Six PWM Channels
 - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
Temperature Measurement
 - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
Temperature Measurement
 - Programmable Serial USART
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Byte-oriented 2-wire Serial Interface (Philips I²C compatible)
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
 - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 23 Programmable I/O Lines
 - 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF
- Operating Voltage:
 - 1.8 - 5.5V
- Temperature Range:
 - -40°C to 85°C
- Speed Grade:
 - 0 - 4 MHz@1.8 - 5.5V, 0 - 10 MHz@2.7 - 5.5V, 0 - 20 MHz @ 4.5 - 5.5V
- Power Consumption at 1 MHz, 1.8V, 25°C
 - Active Mode: 0.2 mA
 - Power-down Mode: 0.1 µA
 - Power-save Mode: 0.75 µA (Including 32 kHz RTC)



**8-bit AVR[®]
Microcontroller
with 4/8/16/32K
Bytes In-System
Programmable
Flash**

**ATmega48A
ATmega48PA
ATmega88A
ATmega88PA
ATmega168A
ATmega168PA
ATmega328
ATmega328P**

Summary

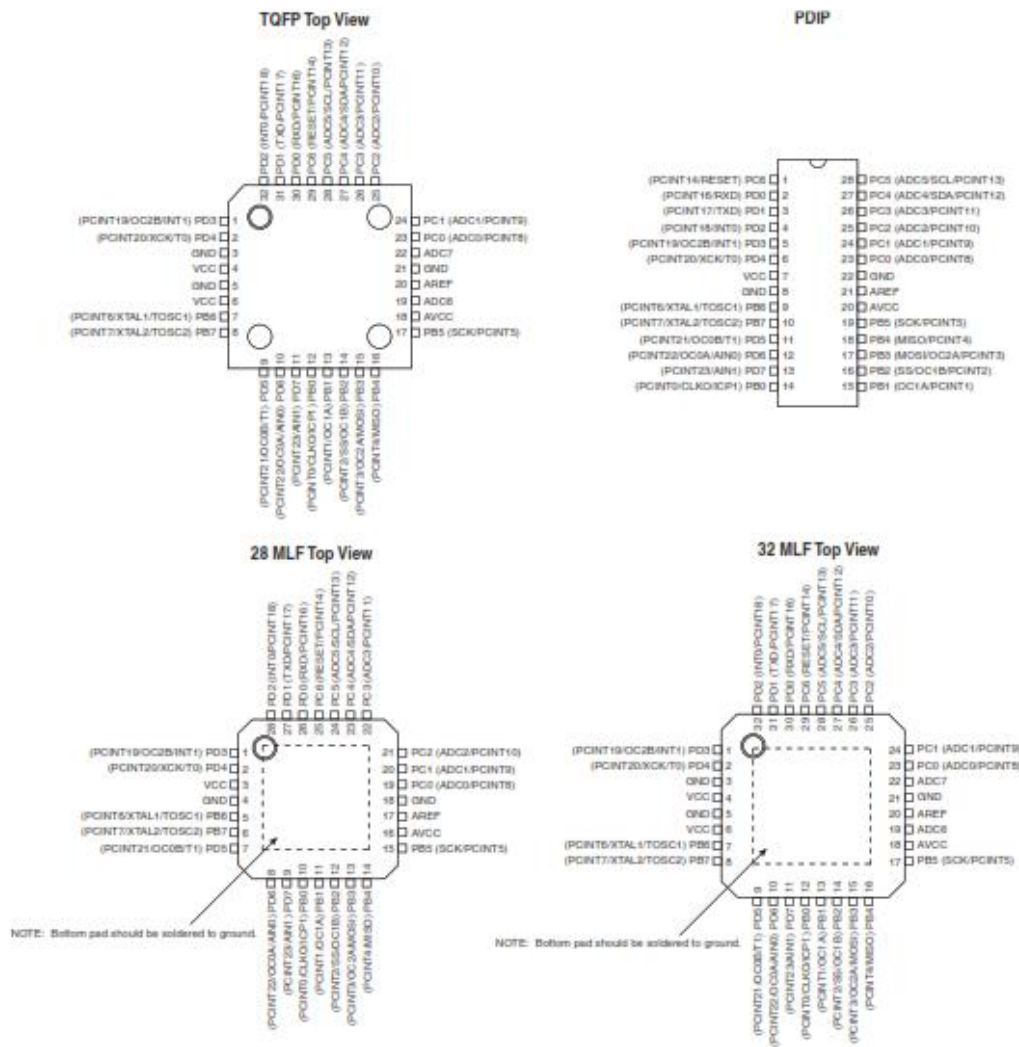
Rev. 8271BS-AVR-04/10



ATmega48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA/328/328P

1. Pin Configurations

Figure 1-1. Pinout ATmega48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA/328/328P



ATmega48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA/328/328P

1.1 Pin Descriptions

1.1.1 VCC

Digital supply voltage.

1.1.2 GND

Ground.

1.1.3 Port B (PB7:0) XTAL1/XTAL2/TOSC1/TOSC2

Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Depending on the clock selection fuse settings, PB6 can be used as input to the inverting Oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

Depending on the clock selection fuse settings, PB7 can be used as output from the inverting Oscillator amplifier.

If the Internal Calibrated RC Oscillator is used as chip clock source, PB7...6 is used as TOSC2...1 input for the Asynchronous Timer/Counter2 if the AS2 bit in ASSR is set.

The various special features of Port B are elaborated in ["System Clock and Clock Options"](#) on page 26.

1.1.4 Port C (PC5:0)

Port C is a 7-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The PC5...0 output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

1.1.5 PC6/RESET

If the RSTDISBL Fuse is programmed, PC6 is used as an I/O pin. Note that the electrical characteristics of PC6 differ from those of the other pins of Port C.

If the RSTDISBL Fuse is unprogrammed, PC6 is used as a Reset input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a Reset, even if the clock is not running. The minimum pulse length is given in [Table 28-12 on page 323](#). Shorter pulses are not guaranteed to generate a Reset.

The various special features of Port C are elaborated in ["Alternate Functions of Port C"](#) on page 86.

1.1.6 Port D (PD7:0)

Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

ATmega48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA/328/328P

The various special features of Port D are elaborated in "Alternate Functions of Port D" on page 89.

1.1.7 AV_{CC}

AV_{CC} is the supply voltage pin for the A/D Converter, PC3:0, and ADC7:6. It should be externally connected to V_{CC}, even if the ADC is not used. If the ADC is used, it should be connected to V_{CC} through a low-pass filter. Note that PC6...4 use digital supply voltage, V_{CC}.

1.1.8 AREF

AREF is the analog reference pin for the A/D Converter.

1.1.9 ADC7:6 (TQFP and QFN/MLF Package Only)

In the TQFP and QFN/MLF package, ADC7:6 serve as analog inputs to the A/D converter. These pins are powered from the analog supply and serve as 10-bit ADC channels.

2.2 Comparison Between Processors

The ATmega48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA/328/328P differ only in memory sizes, boot loader support, and interrupt vector sizes. Table 2-1 summarizes the different memory and interrupt vector sizes for the devices.

Table 2-1. Memory Size Summary

Device	Flash	EEPROM	RAM	Interrupt Vector Size
ATmega48A	4K Bytes	256 Bytes	512 Bytes	1 instruction word/vector
ATmega48PA	4K Bytes	256 Bytes	512 Bytes	1 instruction word/vector
ATmega88A	8K Bytes	512 Bytes	1K Bytes	1 instruction word/vector
ATmega88PA	8K Bytes	512 Bytes	1K Bytes	1 instruction word/vector
ATmega168A	16K Bytes	512 Bytes	1K Bytes	2 instruction words/vector

ATmega48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA/328/328P

Table 2-1. Memory Size Summary


Device	Flash	EEPROM	RAM	Interrupt Vector Size
ATmega168PA	16K Bytes	512 Bytes	1K Bytes	2 instruction words/vector
ATmega328	32K Bytes	1K Bytes	2K Bytes	2 instruction words/vector
ATmega328P	32K Bytes	1K Bytes	2K Bytes	2 instruction words/vector

ATmega48A/48PA/88A/88PA/168A/168PA/328/328P support a real Read-While-Write Self-Programming mechanism. There is a separate Boot Loader Section, and the SPM instruction can only execute from there. In ATmega 48A/48PA there is no Read-While-Write support and no separate Boot Loader Section. The SPM instruction can execute from the entire Flash.

3. Resources

A comprehensive set of development tools, application notes and datasheets are available for download on <http://www.atmel.com/avr>.



Anexo B. Datasheet sensor OD atlas scientific


AtlasScientificTM
 Environmental Robotics
 V 4.3
 Revised 7/20

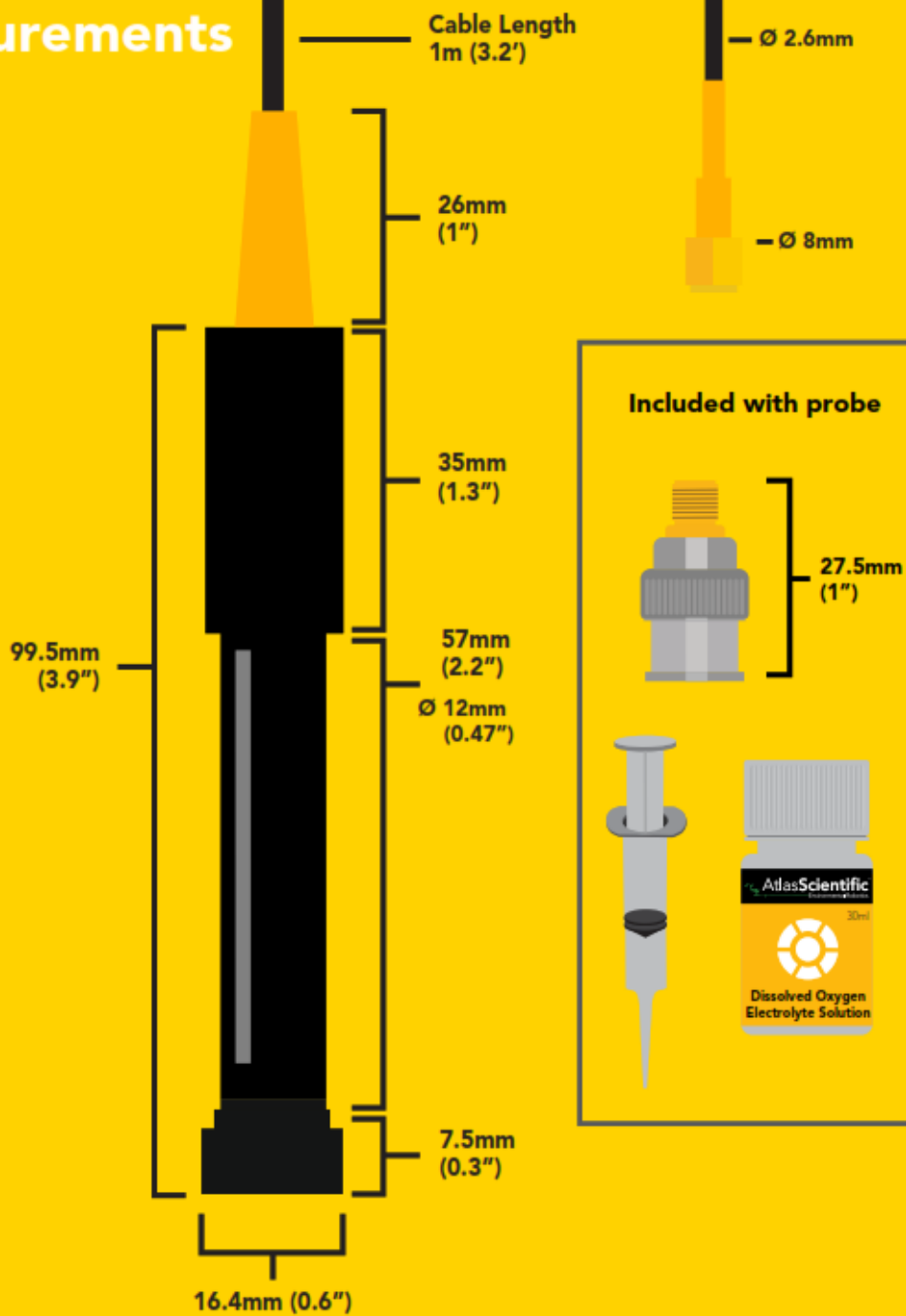
Gen 2

Lab Grade D.O. Probe

Reads	Dissolved Oxygen
Range	0 – 100 mg/L
Accuracy	+/- 0.05 mg/L
Response time	~0.3 mg/L/per sec
Temperature range °C	1 – 60 °C
Max pressure	3,447 kPa (500 PSI)
Max depth	343 Meters (1,125 ft)
Connector	Male SMA / Male BNC
Cable length	1 meter
Internal temperature sensor	No
Time before recalibration	~1 Year
Life expectancy	5 Years +
Maintenance	~18 Months

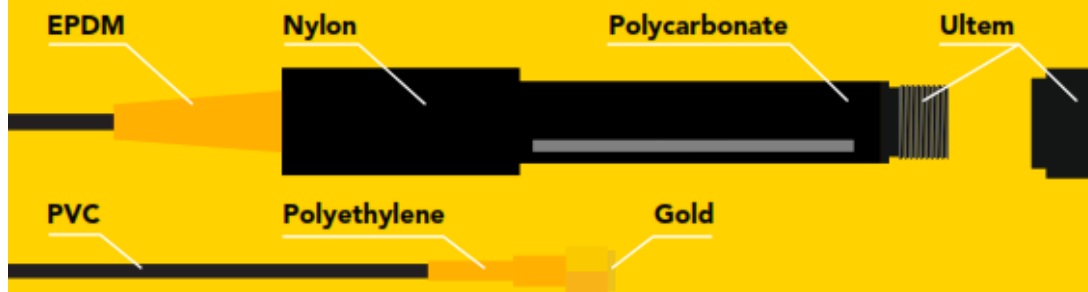
Measurements



Specifications

Max depth	343 meters (1,125 ft)
Cable length	1 meter
Weight	52 grams
Speed of response	~0.3 mg/L/per sec
Dimensions	16.5mm x 124mm (0.5" x 4.9")
SMA connector	Male
Membrane type	PTFE
Sterilization	Chemical only
Food safe	Yes
Included with probe	SMA to BNC adapter

Materials



This Dissolved Oxygen probe can be fully submerged in fresh or salt water, up to the SMA connector indefinitely.

Typical applications

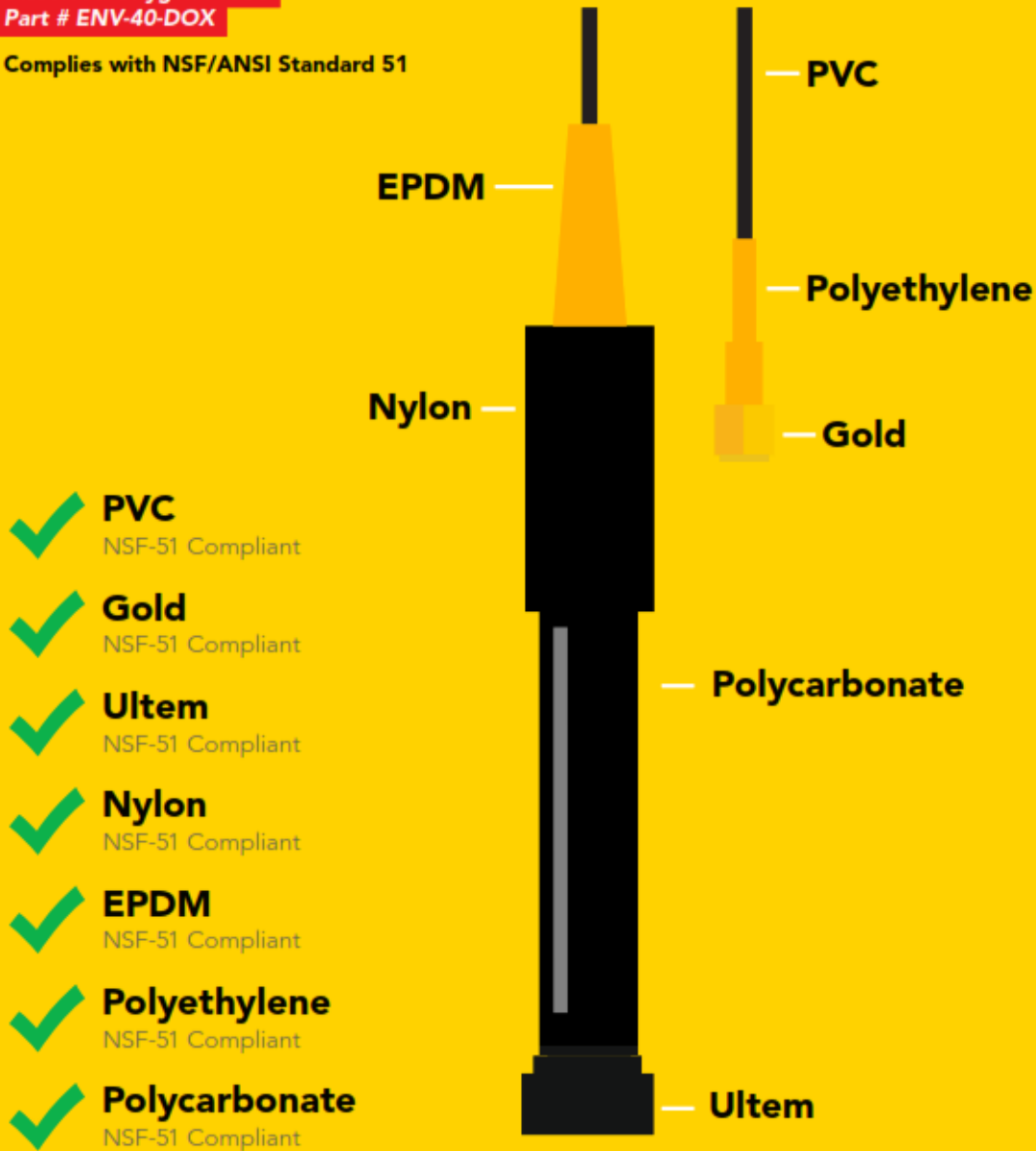
- Standard Lab use
- Field use
- Hydroponics
- Fish keeping
- Wine making
- Environmental monitoring

NSF/ANSI 51 Compliant

Atlas Scientific LLC, hereby certifies that,

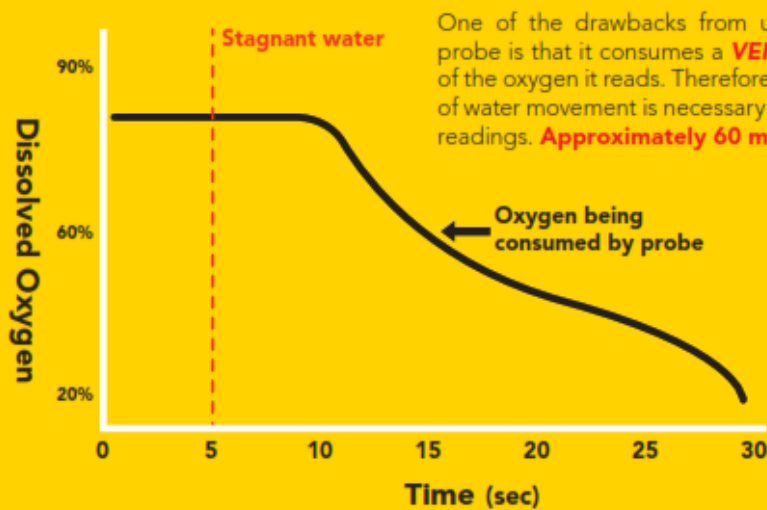
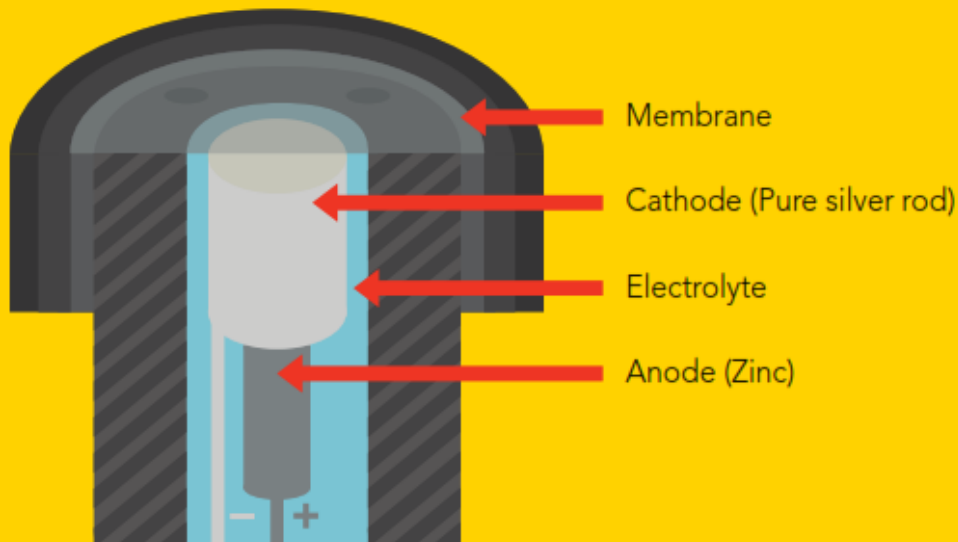
Dissolved Oxygen Probe
Part # ENV-40-DOX

Complies with NSF/ANSI Standard 51



Operating principle

A galvanic dissolved oxygen probe consists of a PTFE membrane, an anode bathed in an electrolyte and a cathode. Oxygen molecules diffuse through the probe's membrane at a constant rate (without the membrane the reaction happens too quickly). Once the oxygen molecules have crossed the membrane they are reduced at the cathode and a small voltage is produced. If no oxygen molecules are present, the probe will output 0 mV. As the oxygen increases so does the mV output from the probe. Each probe will output a different voltage in the presence of oxygen. The only thing that is constant is that **0mV = 0 Oxygen**.

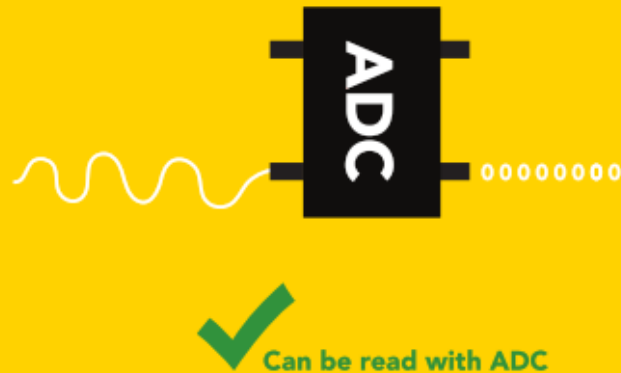


One of the drawbacks from using a galvanic probe is that it consumes a **VERY** small amount of the oxygen it reads. Therefore, a small amount of water movement is necessary to take accurate readings. **Approximately 60 ml/min**.

This galvanic dissolved oxygen probe is a passive device that generates a small voltage from 0mv – 60+ mv depending on the oxygen saturation of the PTFE sensing membrane. This voltage can easily be read by a multimeter or an analog to digital converter.



Can be read with Multimeter



Can be read with ADC

How often do you need to recalibrate a dissolved oxygen probe?

Because every use case is different, there is no set schedule for recalibration.

The dissolved oxygen probe reacts with oxygen in the water, the more oxygen it reacts with the more the probe is depleted of its electrolyte solution. Typically a dissolved oxygen probe will last ~2 years before the electrolyte is depleted (*results will vary*). When the electrolyte is depleted, the probe will read very low numbers. Best practice is to replace the electrolyte solution and PTFE membrane every 1 – 2 years.

The Gen 2 Dissolved Oxygen probe comes with:



**30ml
Dissolved Oxygen
Electrolyte Solution**

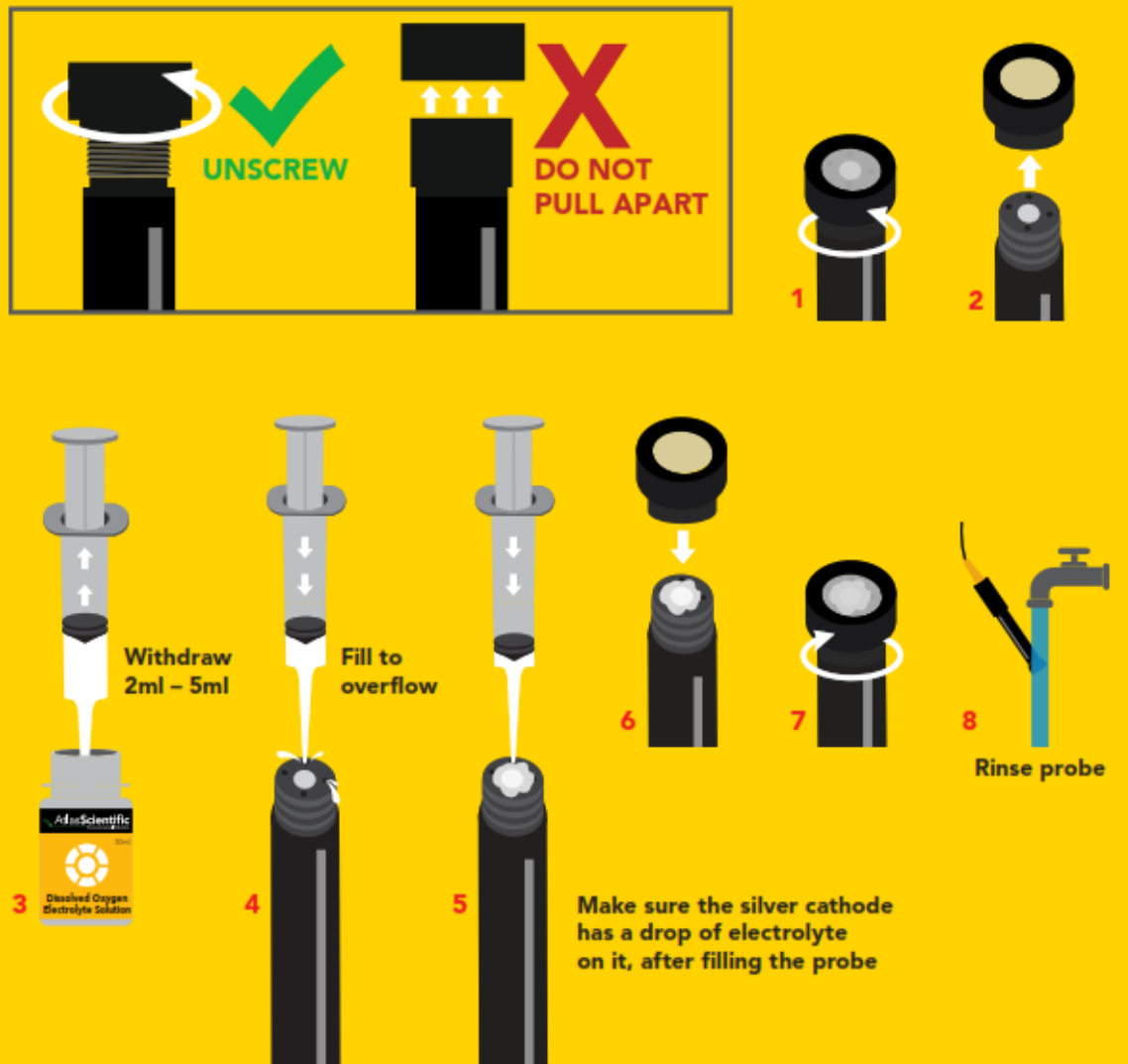


Syringe

How to recondition the lab grade dissolved oxygen probe

During usage, a small amount of electrolyte solution within the dissolved oxygen probe will deplete. In this case, you will need to add more solution into the probe.

To add more electrolyte solution: Carefully unscrew the probes membrane cap. Using the supplied syringe, withdraw 2ml – 5ml of electrolyte solution. Insert the syringe into one of the four holes surrounding the silver cathode. Inject solution until it leaks out one of the fill holes. Make sure the silver cathode has a drop of electrolyte on it, after filling the probe. Screw membrane cap back onto probe. Rinse probe.



Probe cleaning

Over time dissolved oxygen probes can become dirty and covered in chemical deposits. Soft coatings can be removed by lightly brushing around the sides of the probe and membrane cap. If the probes membrane is in need of cleaning, use a mild bleach mixture to gently wash away any deposits.

DO NOT USE A BRUSH TO CLEAN THE MEMBRANE

If the probes membrane is ripped it must be replaced, as it will cause irregular readings.



Anexo C. Datasheet circuito de acondicionamiento de sensor DO



AtlasScientificTM
Environmental Robotics
V 5.4
Revised 7/20

EZO-DOTM

Embedded Dissolved Oxygen Circuit

Reads	Dissolved Oxygen	
Range	0.01 – 100+ mg/L 0.1 – 400+ % saturation	
Accuracy	+/- 0.05 mg/L	
Response time	1 reading per sec	
Supported probes	Any galvanic probe	
Calibration	1 or 2 point	
Temperature, salinity and pressure compensation	Yes	
Data protocol	UART & I²C	
Default I ² C address	97 (0x61)	
Operating voltage	3.3V – 5V	
Data format	ASCII	

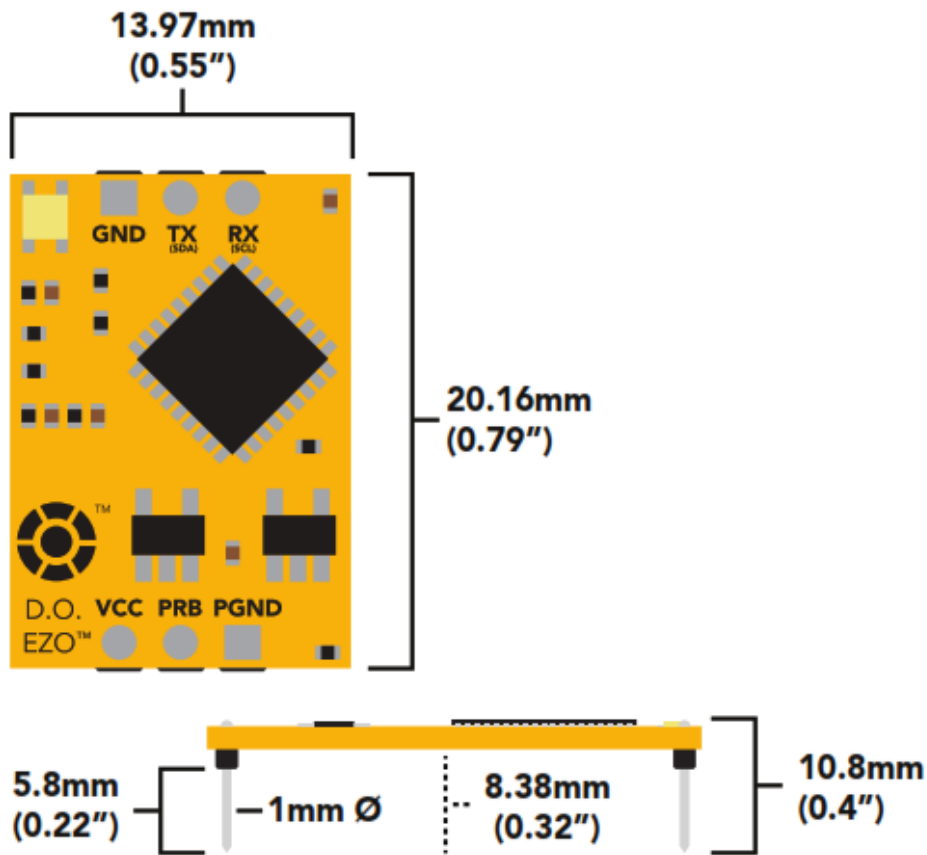


PATENT PROTECTED

Written by Jordan Press
Designed by Noali Press

This is an evolving document, check back for updates.

EZO™ circuit dimensions



Power consumption Absolute max ratings

	LED	MAX	STANDBY	SLEEP
5V	ON	13.5 mA	13.1 mA	0.66 mA
	OFF	12.7 mA	12.7 mA	
3.3V	ON	12.1 mA	12 mA	0.3 mA
	OFF	11.9 mA	11.9 mA	

Parameter	MIN	TYP	MAX
Storage temperature (EZO™ D.O.)	-65 °C		125 °C
Operational temperature (EZO™ D.O.)	-40 °C	25 °C	85 °C
VCC	3.3V	5V	5.5V

Single point calibration

Carefully pull off and discard the cap from the Dissolved Oxygen probe. Let the Dissolved Oxygen probe sit, exposed to air until the readings stabilize. (*small movement from one reading to the next is normal*).



```

15.03
14.45
14.08
13.95
13.95
13.95
cal
*OK
9.09
9.09
  
```

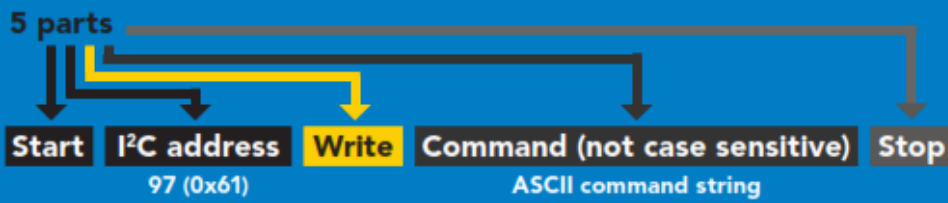
X Unstabilized

✓ Stabilized

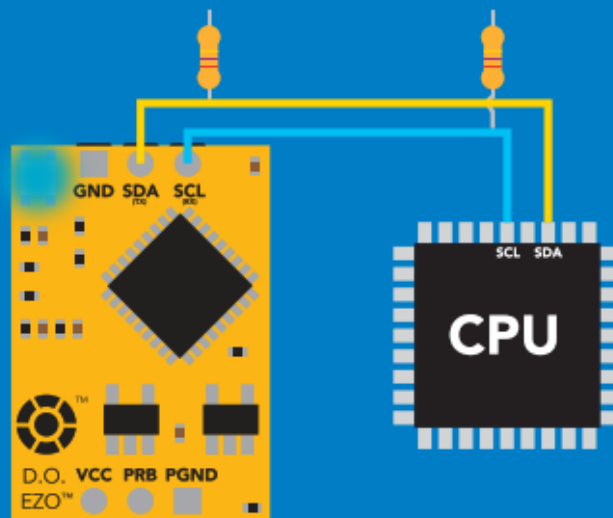
Once the readings have stabilized, issue the calibration command. **"cal"**

After calibration is complete, you should see readings between **9.09 – 9.1X mg/L**.
(*only if temperature, salinity and pressure compensation are at default values*)

Sending commands to device



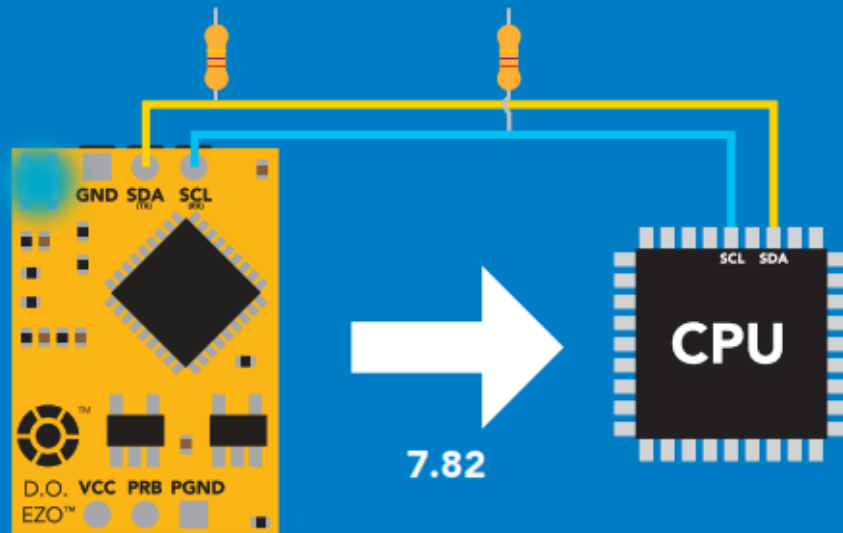
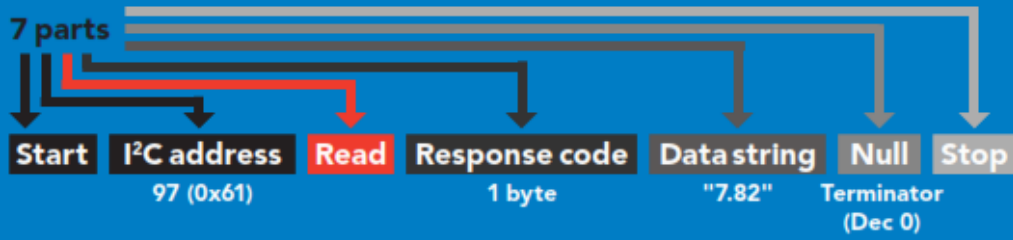
Example



Advanced



Requesting data from device



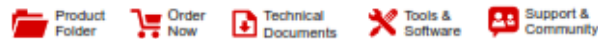
Advanced



1 55 46 56 50 0 = 7.82

Dec ASCII Dec

Anexo D. Datasheet de sensor de temperatura Lm35



LM35

SNIS159H – AUGUST 1999 – REVISED DECEMBER 2017

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

1 Features

- Calibrated Directly in Celsius (Centigrade)
- Linear + 10-mV/°C Scale Factor
- 0.5°C Ensured Accuracy (at 25°C)
- Rated for Full -55°C to 150°C Range
- Suitable for Remote Applications
- Low-Cost Due to Wafer-Level Trimming
- Operates From 4 V to 30 V
- Less Than 60-µA Current Drain
- Low Self-Heating, 0.08°C in Still Air
- Non-Linearity Only ±½°C Typical
- Low-Impedance Output, 0.1 Ω for 1-mA Load

2 Applications

- Power Supplies
- Battery Management
- HVAC
- Appliances

3 Description

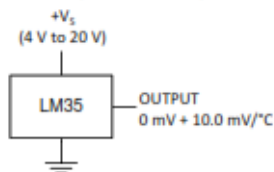
The LM35 series are precision integrated-circuit temperature devices with an output voltage linearly-proportional to the Centigrade temperature. The LM35 device has an advantage over linear temperature sensors calibrated in Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from the output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 device does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of ±½°C at room temperature and ±¾°C over a full -55°C to 150°C temperature range. Lower cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The low-output impedance, linear output, and precise inherent calibration of the LM35 device makes interfacing to readout or control circuitry especially easy. The device is used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As the LM35 device draws only 60 µA from the supply, it has very low self-heating of less than 0.1°C in still air. The LM35 device is rated to operate over a -55°C to 150°C temperature range, while the LM35C device is rated for a -40°C to 110°C range (-10° with improved accuracy). The LM35-series devices are available packaged in hermetic TO transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D devices are available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D device is available in an 8-lead surface-mount small-outline package and a plastic TO-220 package.

Device Information⁽¹⁾

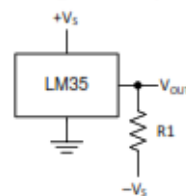
PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM35	TO-CAN (3)	4.699 mm × 4.699 mm
	TO-92 (3)	4.30 mm × 4.30 mm
	SOIC (5)	4.90 mm × 3.91 mm
	TO-220 (3)	14.956 mm × 10.16 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

Basic Centigrade Temperature Sensor (2°C to 150°C)



Full-Range Centigrade Temperature Sensor



Choose $R_1 = -V_S / 50 \mu\text{A}$
 $V_{\text{OUT}} = 1500 \text{ mV at } 150^\circ\text{C}$
 $V_{\text{OUT}} = 250 \text{ mV at } 25^\circ\text{C}$
 $V_{\text{OUT}} = -500 \text{ mV at } -55^\circ\text{C}$



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

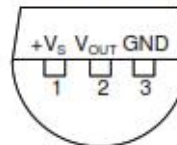
5 Pin Configuration and Functions

NDV Package
 3-Pin TO-CAN
 (Top View)

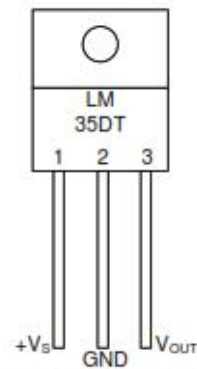


Case is connected to negative pin (GND)
 Refer the second NDV0003H page for reference

LP Package
 3-Pin TO-92
 (Bottom View)



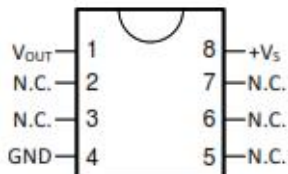
NEB Package
 3-Pin TO-220
 (Top View)



Tab is connected to the negative pin (GND).

NOTE: The LM35DT pinout is different than the discontinued LM35DP

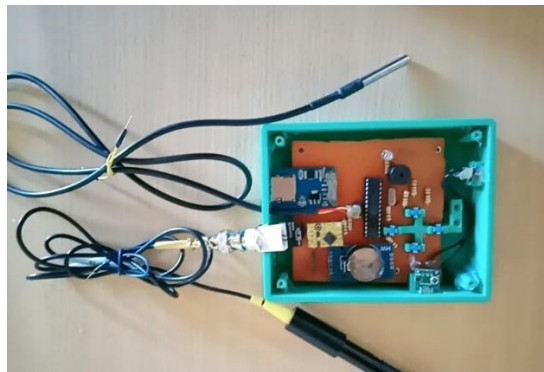
D Package
 8-PIN SOIC
 (Top View)



N.C. = No connection

Pin Functions

NAME	PIN				TYPE	DESCRIPTION
	TO46	TO92	TO220	SO8		
V _{OUT}	2	2	3	1	O	Temperature Sensor Analog Output
N.C.	—	—	—	2	—	No Connection
	—	—	—	3		
GND	3	3	2	4	GROUND	Device ground pin, connect to power supply negative terminal
N.C.	—	—	—	5	—	No Connection
	—	—	—	6		
	—	—	—	7		
+V _S	1	1	1	8	POWER	Positive power supply pin

Anexo E. Dispositivo de medición, Sustancia de calibración a 0 mg/L y Electrolito.

Dispositivo de medición (Autoría propia.)

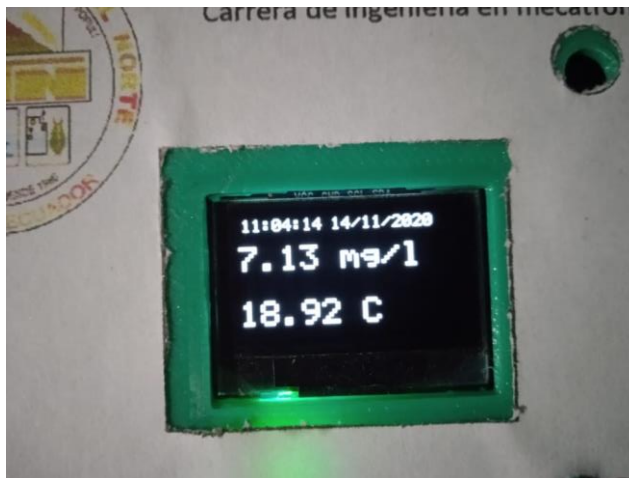


Sustancia de calibración (Autoría propia.)



Electrolito de sensor de OD (Autoría propia.)

Anexo F. Interfaces del dispositivo

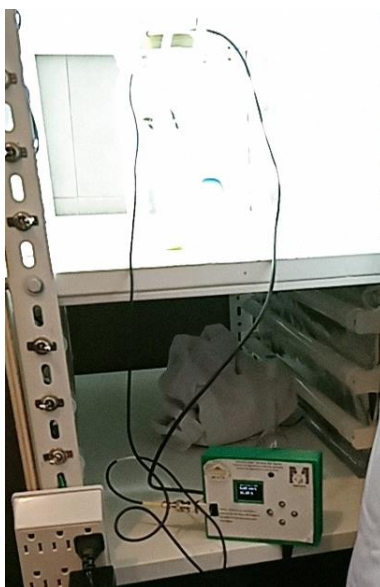


Pantalla principal (Autoría propia.)



Interfaz de configuración (Autoría propia.)

Anexo G. Fases de cultivo de las microalgas



Fase inicial (Autoría propia.)

Nota. Imagen obtenida en los laboratorios de biotecnología de la UTN



Cultivo de microalgas en fase de crecimiento exponencial (Autoría propia.)

Nota. Imagen obtenida en los laboratorios de biotecnología de la UTN. Autoría propia



Cosecha de la biomasa (Autoría propia.)

Nota. Imagen obtenida en los laboratorios de biotecnología de la UTN. Autoría propia

Anexo H. Diagrama de conexión del sistema de medición

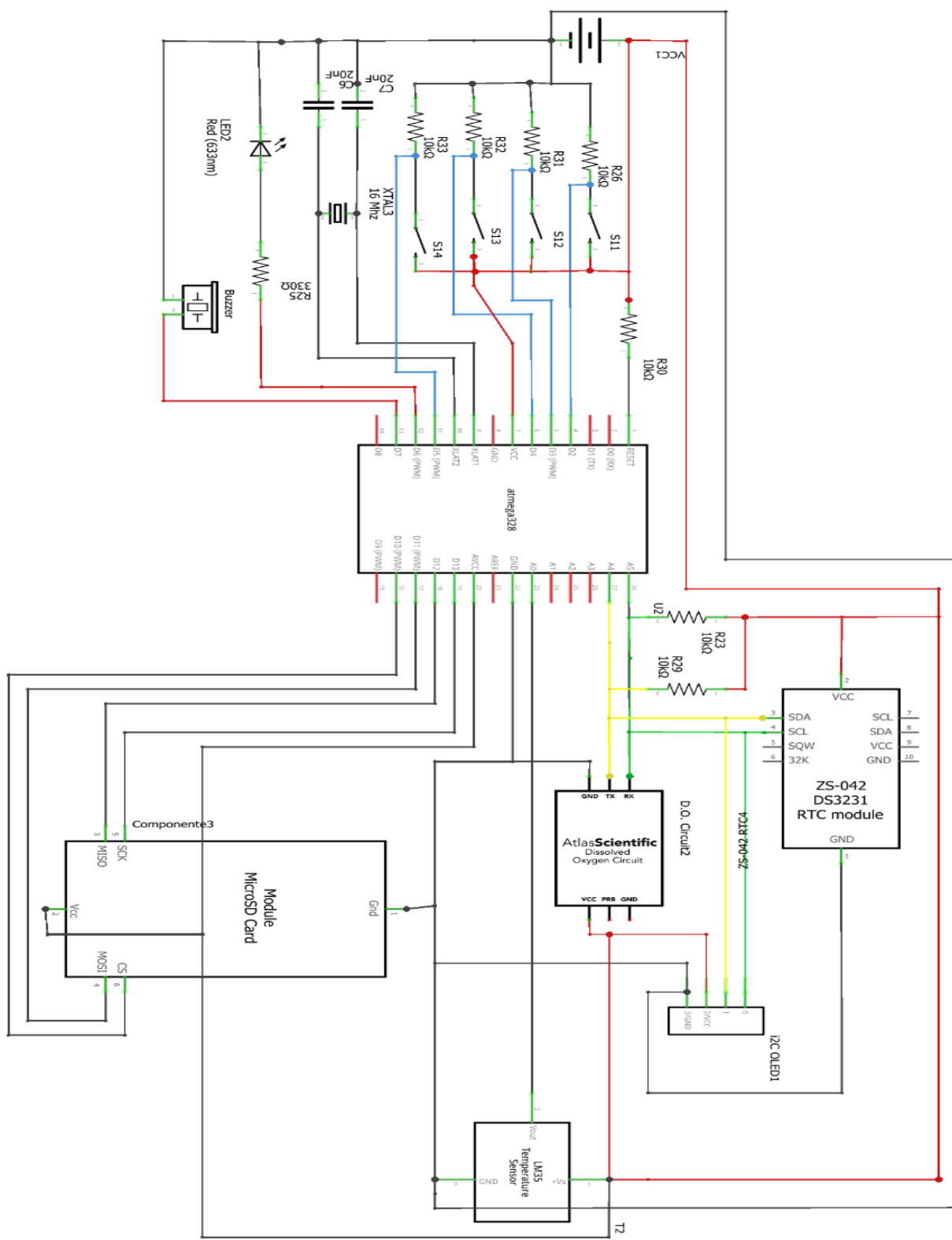


Imagen de autoría propia

Anexo I. Programa implementado en Atmega328P

```

//*****LIBRERIA DE I2C*****/
#include <Wire.h> //habilitamos el i2c
//*****librerias para pantalla oled*****/
#include "SSD1306Ascii.h"
#include "SSD1306AsciiWire.h"
#include <SPI.h> //*****libreria para SD comunicacion SPI
#include <SD.h> //*****libreria para SD
#include <RTCLib.h> //***** libreria RTC
#include <EEPROM.h> //***** Libreria EEPROM
//***** Variables y constantes de sensor DO*****/
#define i2cDo 97 //direccion i2c sensor DO
byte do_dato[20]; //almacena datos enviados por i2c del sensor DO
char do_almacena=0; //recibe los bytes enviados desde el sensor DO
byte contador_do=0; //contador para array do_dato tiempo entre lecturas 575
float DO=6.6;
//***** Variables y constantes del modulo RTC*****/
char bufferFechaHora[17]; //variable almacena fecha y hora
char bufferFecha[9];
char bufferHora[13];
DateTime fecha=0;
//***** Variables y constantes para el modulo SD*****/
#define SSpin 10 //pin esclavo
File archivo; //variable para archivos
//***** Variables y constantes de sensor de temperatura lm35 *****/
float temperaturaC=23;
int pinLm35=A0;
byte numeroLecturaT=0;
float temperaturaA=0;
//*****Variables para filtro de kalman*****/
float varProcess=1e-8;
float Pc=0; //prediccion covarianza
float G=0; //ganancia kalman
float P=1.0; // actualizar covarianza
float Xp=0; //prediccion estado
float Zp=0; //almacena prediccion
float Xe=0; //actualiza el valor usando filtro kalman del sensor
//*****constantes para oled
#define oled_reset -1
SSD1306AsciiWire oled; //inicializamos oled
//*****variable de visualizacion
byte visor=0;
byte posver=0;
//*****variables de pulsador ESC
#define esc 2
byte PulEscAnterior=0; //entero entre 1-255
//*****Variables de pulsador ENT
#define ent 3
byte PulEntAnterior=0;
byte controlBorra=0;
long tiempoInterrupcion=0;

//*****Variable pulsador hacia abajo
#define inf 4

```

```

byte PulInfAnterior=0;
//*****Variable pulsador hacia arriba
#define sup 5
byte PulSupAnterior=0;
//***** variables de configuracion*****//
float DoAlto=0;//28
float DoBajo=0;//8
float TempAlto=0;//35
float TempBajo=0;//15
float TiempoHoras=0; //2
//*****Variables alternas para almacenar la configuracion*****//
float DoAltoA=0;
float DoBajoA=0;
float TempAltoA=0;
float TempBajoA=0;
float TiempoHorasA=0;
byte ControlConfig=5;
byte ControlConfigAnterior=0;
byte ControlVis=0;
int tiempominutos=60*TiempoHoras;
byte minutoAnterior=0;
int tiempoAlmacenar=tiempominutos;
RTC_DS3231 rtc; //inicializacion de modulo rtc
//*****variables para alarma*****//
byte pinAlarmaBuzer=6;
byte pinAlarmaLed=7;
//*****variables booleanas de control*****//
boolean estadoAlarmaAlto=LOW;
boolean estadoAlarmaBajo=LOW;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();//iniciamos i2c
  rtc.begin();//inicializar rtc
  oled.begin(&Adafruit128x64, 0x3C, oled_reset);
  oled.setFont(System5x7);
  SD.begin(SSpin);//inicializar sd
  //***inicializacion de pulsadores
  pinMode(esc,INPUT_PULLUP);
  pinMode(ent,INPUT_PULLUP);
  pinMode(sup,INPUT_PULLUP);
  pinMode(inf,INPUT_PULLUP);
  pinMode(pinAlarmaBuzer,OUTPUT);
  pinMode(pinAlarmaLed,OUTPUT);
  oled.clear();
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ent), cambiarVariable, RISING);
  minutoAnterior=rtc.now().minute(); //obtenemos el minuto del rtc
  //*****Lectura de los datos de configuracion*****//
  DoAlto=EEPROM.get(0,DoAlto);
  DoBajo=EEPROM.get(10,DoBajo);
  TempAlto=EEPROM.get(20,TempAlto);
  TempBajo=EEPROM.get(30,TempBajo);
  TiempoHoras=EEPROM.get(40,TiempoHoras);
  //*****Actualizamos la variables alternas de configuracion*****//
  DoAltoA=DoAlto;
  DoBajoA=DoBajo;
  TempAltoA=TempAlto;

```

```

    TempBajoA=TempBajo;
    TiempoHorasA=TiempoHoras;
    //*****comentar o eliminar*****//
    Serial.println(DoAlto);//obtener el valor de celda 0 hasta donde corresponda temperatura
    Serial.println(DoBajo);
    Serial.println(TempAlto);
    Serial.println(TempBajo);
    Serial.println(TiempoHoras);
    tiempoAlmacenar=60*TiempoHoras;//ponemos intervalo de tiempo a almacenar
    tiempominutos=60*TiempoHoras;
    oled.set2X();
    oled.println();
    oled.println(" Iniciando");
    oled.println(" Sistema");
    oled.clear();
    oled.set1X();
    medirTemperatura();//TOMMOS VALOR INICIAL PARA NO ALARMAS
    medirDO(); }
void loop() {
byte PulEscActual=digitalRead(esc);//lee valor de pulsador ESC
byte PulEntActual=digitalRead(ent);//Lee valor de pulsador ENT
byte PulSupActual=digitalRead(sup);//lee valor de pulsador superior
byte PulInfActual=digitalRead(inf);//lee valor de pulsador inferior
//*****lectura de datos del rtc *****//
fecha=rtc.now(); //obtenemos datos del rtc
//almacenamos los datos rtc en una arreglo %02d/%02d/%02d fecha.day(),fecha.month(),fecha.year();
//*****ejecutamos funcion de almacenamiento*****//
if(fecha.minute()!=minutoAnterior)//comparamos si hay cambios en los minutos
{
    minutoAnterior=fecha.minute();//actualizamos valor de minutos
    tiempoAlmacenar=tiempoAlmacenar-1;
    Serial.println("tiempo faltante para almacenar");
    Serial.println(tiempoAlmacenar);
    if(tiempoAlmacenar==0)
    {
        tiempoAlmacenar=tiempominutos;//reiniciamos valor
        almacenarDatos(); //llamamos funcion de almacenamiento
        Serial.println("ALMACENANDO"); } }
if(visor==0)//pantalla principal
{ //tiempo que no existe cambios sustanciales en el ambiente de las micro algas 15 min
if(fecha.minute()%2==0)
{ medirTemperatura();
medirDO();
VerificarAlarmas(); }
pantallaPrincipal();}
//*****interrupcion para ingresar a menu de configuración*****//
if(visor==0 && controlBorra==1)//pulse interrupcion y muestro el menu de configuracion
{
    visor=1;
    oled.clear();}
//*****ejecutamos la calibracion*****//
if(ControlConfig==12)
{
    calibracion();
    visor=0;
    posver=0;
}
}

```

```

    controlBorra=0;//
    ControlConfig=5;
    ControlVis=2; }
if(ControlVis==2)
{
    almacenarConfiguracion();
    oled.clear();
    oled.println();
    oled.println("configurar");
    oled.println("");
    oled.println(" exito");
    delay(3000);
    oled.clear();
    ControlVis=0; }
//*****entro a menu de configuración*****//
if(visor==1)
{
if( posver==0)//vizualizamos menu configuracion opcion DoAlto
{
visualizar(posver); }
//*****navegamos en las opciones del menu de configuracion*****//
if(ControlVis==0)//
{
//botonera superior
if(PulSupActual==1 && PulSupAnterior==0)
{
    posver--;//restamos
    oled.clear();
    if(posver>6)//cuando llega a 0 salta a 255 es dato tipo byte
    {
        posver=5; } }
//*****botonera inferior*****//
if(PulInfActual==1 && PulInfAnterior==0)
{ posver++;
    oled.clear();
    if(posver>5)
    {
        posver=0; } }
visualizar(posver); }
//*****muestro la variable a configurar*****//
if(ControlConfig!=ControlConfigAnterior)//
{
    oled.clear();
    visualizar(ControlConfig);
    ControlConfigAnterior=ControlConfig;//actualizamos para que se ejecute una sola vez
}
//*****cambia valores de variables y vizualiza*****//
if(ControlVis==1)
{
if(PulSupActual==1 && PulSupAnterior==0 && ControlConfig>6)
{
    if(ControlConfig==7)//menu DO alto incrementa valor alarma superior
    {
        DoAltoA++;//sumamos
        if(DoAltoA>40)
        {

```



```

    DoAltoA=9; } }
if(ControlConfig==8)//menu Do alto incrementa valor alarma inferior
{
    DoBajoA++;
    if(DoBajo>8)
    {
        DoBajoA=0; } }

if(ControlConfig==9)//menu temperatura alto ncrementa valor superior
{
    TempAltoA++;
    if(TempAltoA>50)
    {
        TempAltoA=16; } }
if(ControlConfig==10)//menu temperatura bajo incrementa valor superior
{
    TempBajoA++;
    if(TempBajoA>15)
    {
        TempBajoA=3; } }
if(ControlConfig==11)//menu hora de almacenamiento incrementa valor
{
    TiempoHorasA=TiempoHorasA+0.25;
    if(TiempoHorasA>6 )
    {
        TiempoHorasA=0.25; } }
oled.clear();
visualizarc(ControlConfig); }
//*****botonera inferior*****//
if(PullInfActual==1 && PullInfAnterior==0 and ControlConfig>6)
{
    if(ControlConfig==7)//si estoy en el menu de DO alto
    {
        DoAltoA--;
        if(DoAltoA<9)
        {
            DoAltoA=40; } }
    if(ControlConfig==8)//si estoy en el menu de Bajo
    {
        DoBajoA--;
        if(DoBajoA<0)
        {
            DoBajoA=8; } }
    if(ControlConfig==9)//menu Temperatura alto
    {
        TempAltoA--;
        if(TempAltoA<16)
        {
            TempAltoA=50; } }
    if(ControlConfig==10)//menu temperatura bajo valor inferior
    {
        TempBajoA--;
        if(TempBajoA<3)
        {
            TempBajoA=15; } }
    if(ControlConfig==11)// configura hora de almacenamiento decrementa Tiempo

```

```

{
  TiempoHorasA=TiempoHorasA-0.25;
  if(TiempoHorasA<0.15)
  {
    TiempoHorasA=6; } }
  oled.clear();
  visualizarc(ControlConfig); } }
//*****retrocedo pantalla principal*****//
if(PulEscActual==1 && PulEscAnterior==0)
{
  visor=0;
  posver=0;
  controlBorra=0;//
  ControlConfig=5;
  ControlVis=0;
  oled.clear(); } }

//*****actualizamos valores de pulsadores*****//
delay(5);
PulEscAnterior=PulEscActual;
PulSupAnterior=PulSupActual;
PulInfAnterior=PulInfActual; }
//*****INICIO DE FUNCIONES*****\\
void cambiarVariable();//activa interrupcion
{
  if(millis()-tiempoInterrupcion>500)
  {
    tiempoInterrupcion=millis();
    controlBorra=1;//ingresa al menu de configuracion
    if(ControlVis==1)
    {
      visor=0;
      posver=0;
      controlBorra=0;//
      ControlConfig=5;
      ControlVis=2;
//*****ACTUALIZA VARIABLES DE CONFIGUARAR*****//
      DoAlto=DoAltoA;
      DoBajo=DoBajoA;
      TempAlto=TempAltoA;
      TempBajo=TempBajoA;
      TiempoHoras=TiempoHorasA; }
    if(ControlConfig>=6)
    {
      ControlVis=1;
      if(posver==0)//ingresa a configurara DoAlto
      {
        ControlConfig=7;
        DoAltoA=DoAlto; }
      if(posver==1)//ingresa a configurara DoBajo
      {
        ControlConfig=8;
        DoBajoA=DoBajo; }
      if(posver==2)//ingresa a configurara TempAlto
      {
        ControlConfig=9;

```

```

    TempAltoA=TempAlto;    }
if(posver==3)//ingresa a configurara TempBajo
{
    ControlConfig=10;
    TempBajoA=TempBajo;    }
if(posver==4)//ingresa a configurara Tiempo para almacenar datos
{
    ControlConfig=11;
    TiempoHorasA=TiempoHoras;    }
if(posver==5)//ingresa a calibracion del sensor DO
{
    ControlConfig=12;    } }
if(ControlConfig==5 and controlBorra==1)
{
    ControlConfig=6;
}
delay(100);    }}
//*****COMIENZA FUNCION VIZUALIZAR*****//
void visualizarc(byte c)
{
//*****visualizar configuraciones*****//
oled.setCursor(20,0);//COLOCA CURSOR (columna, fila)
oled.set1X();//tamaño de letra
oled.println(F("AJUSTE ALARMAS"));
oled.println(F(" "));
oled.set2X();
if(c==7)
{
oled.println(F(" "));
oled.print(DoAltoA);
oled.print(F(" mg/L"));    }
if(c==8)
{
oled.println(F(" "));
oled.print(DoBajoA);
oled.print(F(" mg/L"));    }
if(c==9)
{
oled.println(F(" "));
oled.print(TempAltoA);
oled.print(F(" C"));    }
if(c==10)
{
oled.println(F(" "));
oled.print(TempBajoA);
oled.print(F(" C"));    }
if(c==11)
{
byte hora=(int)TiempoHorasA;
byte minutos=((TiempoHorasA-hora)*15)/0.25;
oled.println(F(" "));
oled.print(hora);
oled.print(":");
oled.print(minutos);
oled.print(F(" h"));    } }
//*****SEGUNDA FUNCION DE VISUALIZAR*****//

```

```

void visualizar(byte a)
{
  if(ControlVis==0)
  {
    oled.setCursor(20,0);//COLOCA CURSOR (columna, fila)
    oled.set1X();//tamaño de letra
    oled.println(F("AJUSTE ALARMAS"));
    oled.println(F(" "));
    oled.set2X();
    if(a==0)
    {
      oled.println(F("DO alto "));
      oled.set1X();
      oled.println(F(" "));
      oled.println(F("DO bajo")); }
    if(a==1)
    {
      oled.println(F("DO bajo"));
      oled.set1X();
      oled.println(F(" "));
      oled.println(F("temp Alto")); }
    if(a==2)
    {
      oled.println(F("temp alto"));
      oled.set1X();
      oled.println(F(" "));
      oled.println(F("temp bajo")); }
    if(a==3)
    {
      oled.println(F("temp bajo"));
      oled.set1X();
      oled.println(F(" "));
      oled.println(F("Almacenar")); }
    if(a==4)
    {
      oled.println(F("Almacenar"));
      oled.set1X();
      oled.println(F(" "));
      oled.println(F("Calibrar")); }
    if(a==5)
    {
      oled.println(F("Calibrar"));
      oled.set1X();
      oled.println(F(" "));
      oled.println(F("DO alto")); } } }
//*****leer valores de DO*****//
void medirDO()
{
  Wire.beginTransmission(i2cDo); //iniciamos transmision de comando i2c
  Wire.write('r'); //enviamos comando de lectura
  Wire.endTransmission(); //finalizamos transmision
  delay(675); //esperamos hasta realizar la transmision
  Wire.requestFrom(i2cDo,20,1); //realizamos peticion de 20 datos
  if(Wire.read()==1) //peticion correcta primer byte==1
  {
    while(Wire.available()) //verifica la correcta lectura de los bytes

```

```

{
do_almacena=Wire.read(); //almacenamos los bytes leidos
do_datos[contador_do]=do_almacena; //almacenamos bytes en un arreglo
contador_do+=1; //incrementamos contador
if(do_almacena==0 || contador_do>=19)
{
contador_do=0;
break; } } }
DO=atof(do_datos); }
//*****Funcion lectura temperatura*****//
void medirTemperatura()
{
float lecturas=0;
lecturas= (5.0*analogRead(pinLm35)*100.0)/1024;
//*****filtro de kalman*****//
for(int i=0;i<1000;i++)
{
Pc=P+varProcess; //predecimos covarianza
Xp=Xe; // predecimos el estado
G=Pc/(Pc+lecturas); //calculo ganancia
Zp=Xp;
Xe=G*(lecturas-Zp)+Xp; //actualizamos estimacion del sensor
P=(1-G)*Pc; }
temperaturaC=Xe; }
//*****FUNCION DE ALMACENAMIENTO*****//
void almacenarDatos()
{
archivo=SD.open("datos.txt",FILE_WRITE);//abre el archivo si existe o lo crea
float promedioDO=0;// variables temporales para almacenar el promedio
for(int i=1;i<21;i++)
{
fecha=rtc.now();//actualizamos fecha para almacenar
medirTemperatura();//actualizamos valor temperatura
medirDO();//actualizamos valor oxigeno disuelto

sprintf(bufferFechaHora,"%02d/%02d/%02d,%02d:%02d:%02d",fecha.day(),fecha.month(),fecha.year(),fecha
a.hour(),fecha.minute(),fecha.second());
promedioDO=promedioDO+DO;
if(i%4==0 and i>2) //obtendremos un promedio de 5 datos
{
if(archivo)
{
archivo.print(bufferFechaHora);
archivo.print(",");
archivo.print(temperaturaC);
archivo.print(",");
archivo.println(promedioDO/4); }
promedioDO=0; } }
archivo.close(); }
//*****Funcion de almacenamiento EEPROM*****//
void almacenarConfiguracion()
{
EEPROM.put(0,DoAlto); //almacenamiento en posicion 0 Alarma doalto
EEPROM.put(10,DoBajo); //almacenamiento en 10 Alarma dobajo
EEPROM.put(20,TempAlto); //almacenamiento en 20 Alarma temperatura alto
EEPROM.put(30,TempBajo); //almacenamiento en 30 Alarma temperatura bajo

```

```

EEPROM.put(40,TiempoHoras);//almacenamiento en 40 tiempo entre cada almacenamiento
Serial.println("Almacenando configuracion");
Serial.println(DoAlto);
Serial.println(DoBajo);
Serial.println(TempAlto);
Serial.println(TempBajo);
Serial.println(TiempoHoras);
tiempominutos=60*TiempoHoras;
tiempoAlmacenar=tiempominutos; }
//***** SE ELIMINA ARCHIVO ANTERIOR*****//
void eliminarArchivoConfig()
{
  if(SD.exists("configurar.txt"))
  {
    SD.remove("configurar.txt"); } }
//*****Se verifica alarma*****//
void VerificarAlarmas()
{
  if(temperaturaC>TempAlto)
  {
    estadoAlarmaAlto=HIGH;
    digitalWrite(pinAlarmaBuzer,estadoAlarmaAlto);
    digitalWrite(pinAlarmaLed,estadoAlarmaAlto);
    delay(50);
    digitalWrite(pinAlarmaBuzer,LOW);
    oled.clear();
    oled.println("");
    oled.println(temperaturaC);
    oled.println("temperatura");
    oled.println("alta");
    delay(1250);
    digitalWrite(pinAlarmaLed,LOW);
    oled.clear(); }
  if(DO>DoAlto+15)
  {
    estadoAlarmaAlto=HIGH;
    digitalWrite(pinAlarmaBuzer,estadoAlarmaAlto);
    digitalWrite(pinAlarmaLed,estadoAlarmaAlto);
    delay(50);
    digitalWrite(pinAlarmaBuzer,LOW);
    oled.clear();
    oled.println();
    oled.println(DO);
    oled.println("DO alto");
    delay(1250);
    digitalWrite(pinAlarmaLed,LOW);
    oled.clear(); }
  if(DO<DoBajo)
  {
    estadoAlarmaBajo=HIGH;
    digitalWrite(pinAlarmaLed,estadoAlarmaBajo);
    digitalWrite(pinAlarmaBuzer,estadoAlarmaBajo);
    delay(50);
    digitalWrite(pinAlarmaBuzer,LOW);
    oled.clear();
    oled.println();
  }
}

```

```

oled.println(DO);
oled.println("DO bajo");
delay(1250);
digitalWrite(pinAlarmaLed,LOW);
oled.clear(); }
if(temperaturaC<TempBajo)
{
estadoAlarmaBajo=HIGH;
digitalWrite(pinAlarmaLed,estadoAlarmaBajo);
digitalWrite(pinAlarmaBuzer,estadoAlarmaBajo);
delay(50);
digitalWrite(pinAlarmaBuzer,LOW);
oled.clear();
oled.println();
oled.println(temperaturaC);
oled.println("temperatura");
oled.println(" baja");
delay(1250);
digitalWrite(pinAlarmaLed,LOW);
oled.clear(); } }
//*****Funcion de calibracion*****//
void calibracion()
{
Wire.beginTransmission(i2cDo); //iniciamos transmision de comando i2c
Wire.write("cal"); //enviamos comando de lectura
Wire.endTransmission(); //finalizamos transmision
delay(1500);
byte a=0;
for(byte i=0;i<=20;i++)
{
medirDO();
oled.clear();
oled.println();
oled.println(DO);
if(DO>=8.9 && DO<9.3)
{
a=a+1; }
if(a>=10)
{
oled.clear();
oled.println("calibrar");
oled.println("Completo");
delay(3000);
oled.clear();
break; } }
if(a<10)
{
oled.clear();
oled.println("calibrar");
oled.println("fallo");
delay(5000);
oled.clear(); } }
//*****visualizar pantalla principal *****//
void pantallaPrincipal()
{
fecha=rtc.now();

```

```
oled.setCursor(2,0);//COLOCA CURSOR (columna, fila)
oled.set1X();//tamaño de letra
sprintf(bufferHora,"%02d:%02d:%02d",fecha.hour(),fecha.minute(),fecha.second());
oled.print(bufferHora);//impresion hora en pantalla
sprintf(bufferFecha,"%02d/%02d/%02d",fecha.day(),fecha.month(),fecha.year());
oled.setCursor(55,0);
oled.println(bufferFecha);//impresion fecha en pantalla
oled.println();
oled.set2X();
oled.print(DO); //Impresion DO en pantalla
oled.println(F(" mg/l"));
oled.println(" ");
oled.print(temperaturaC);//impresion temperatura pantalla
oled.println(" C"); }
```


Anexo J. Manual de calibración y mantenimiento

1. Diseño y función e instalación

Este dispositivo fue diseñado para ser usado en un fotobiorreactor, este dispositivo realiza mediciones del oxígeno disuelto en unidades de mg/L y la temperatura en unidades de °C del sistema de cultivo de microalgas. El sistema de cultivo de microalga debe ser hermético, por lo cual durante el inicio del proceso de cultivo se debe instalar el dispositivo adecuadamente para evitar que otras especies se alojen en el fotobiorreactor.

1.1. Instalación

Para realizar la instalación del dispositivo tenga en cuenta las dimensiones de las sondas, por lo cual se le aconseja revisar las hojas de datos técnicos correspondientes a cada sonda, en el caso del impermeable de la sonda de temperatura es de 6 mm de diámetro.

Puede acceder a la hoja de datos de las dimensiones de la sonda de oxígeno disuelto, esto lo puede realizar siguiendo los enlaces que se proporcionan en el apartado información adicional, siga el enlace de “*Datos técnicos de la sonda de OD*”.

Debido a que los sistemas de los fotobiorreactores presentan dos sistemas de aireación que tienen como objetivo introducir el alimento de las microalgas y evitar la sedimentación de estas, se debe tener presente en qué tipo de sistema nos encontramos, dependiendo del sistema se pueden producir errores de lectura, estos sistemas de aireación son, por sistema neumático (bomba de aire) y por sistema hidráulico (bomba de agua).

1.1.1. Instalación en sistemas neumático o de burbujeo

En los sistemas con burbujeo se tiene que las burbujas que se generan por la introducción del CO₂ mediante la bomba de aire, pueden quedar atrapadas en la membrana del sensor lo cual ocasiona lecturas erróneas. Por esta razón el sensor debe estar alejado de la entrada del

CO₂. Se necesita un movimiento mínimo de la masa de agua para obtener lecturas correctas del oxígeno presente en el sistema por tanto no lo separe en gran medida de la fuente de movimiento (entrada de CO₂), la posición de la sonda debe ser de un rango de 45°-135° en el cual obtenemos lecturas correctas, pero se tienen mejores resultados a los 90°.

En la figura 1 se puede apreciar la instalación de las sondas, note que la entrada de CO₂ y el sensor de OD están separados una distancia y que la profundidad de la entrada del CO₂ es mayor que la profundidad de las dos sondas.

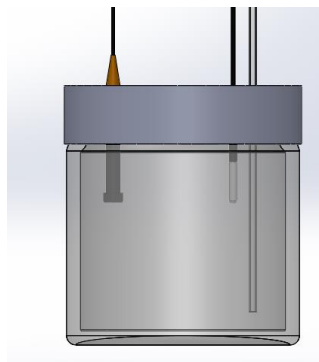


Figura 1. Sonda instalada en fotobiorreactor (Autoría propia.)

1.1.2. Instalación en sistemas de bombas

En los sistemas con bombas de agua se tiene una recirculación del agua del fotobiorreactor, para poder realizar las lecturas se debe instalar el sensor en algún punto del circuito hidráulico. En este punto se deberá tener una conexión Tee PVC de ½", esta parte del circuito deberá reunir ciertos requisitos para poder instalar la sonda, esta tubería deberá estar vertical a la superficie, esto para evitar la acumulación de biomasa por efecto de la gravedad y evitar que la membrana se deteriore rápidamente, el sistema debería presentar un caudal moderado para evitar daño celular con lo cual se cumpliría con el requisito mínimo de caudal para obtener lecturas correctas. En la siguiente figura se muestra cómo debería

quedar una instalación adecuada, donde se puede observar que de la misma forma que en el apartado anterior, la sonda debe estar a 90°, con respecto al flujo del líquido en la tubería.

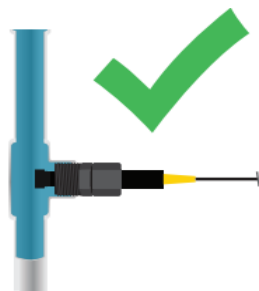


Figura 2. Instalación de sonda en biorreactor tubular, (fabricante sonda de OD.)

2. Visión general

Nuestro dispositivo cuenta con cuatro botones, estos botones tienen la funcionalidad de arriba, abajo, entrar y escape, como se observa en la figura 3, cada botón tiene su respectivo símbolo. Además, tiene alarmas como son, una alarma visual y una alarma auditiva que se activan cuando se tienen valores predefinidos.



Figura 3. Dispositivo de medición del OD (Autoría propia.)

3. Operación del dispositivo

3.1. Conexión de sonda

Antes de poner en funcionamiento nuestro sistema de medición, se debe como primer paso conectar la sonda del oxígeno disuelto. La conexión se debe realizar como se observa en la

figura 4, la sonda de temperatura viene por defecto conectada y para poder desconectar esta, primero deberá quitar la tapa de la carcasa del dispositivo.

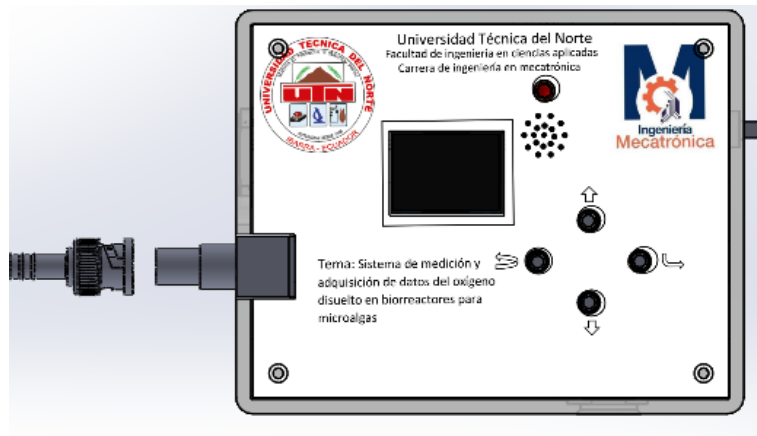


Figura 4. conexión se sonda de oxígeno disuelto (Autoría propia.)

3.2.Puesta en Funcionamiento

para poder encender el dispositivo como primer paso se debe conectar la alimentación, la entrada de alimentación que tiene el dispositivo es un micro USB, puede usar un cargador estándar de un celular. Luego de realizada esta acción debe presionar el botón del costado de la esquina superior derecha, en la figura 5 se puede observar este procedimiento.



Figura 5. Encender el dispositivo (Autoría propia.)

Luego de encendido nuestro dispositivo, aparece la pantalla principal de nuestro dispositivo, esta nos muestra la fecha, hora, OD y temperatura, como se muestra en la figura 5.

3.3. Navegación dentro del menú

Para poder acceder al menú de configuración se debe presionar la tecla Entrar, luego de presionar este botón podremos acceder al menú de ajustes, como se puede ver en la figura 6(B) se muestran las opciones de configuración que aparece luego de presionar la tecla Entrar.



Figura 6. (A) Pantalla principal, (B) menú inicial (Autoría propia.)

3.4. Configuraciones alarmas y almacenamiento

Para poder posicionarse en las demás opciones de configuración se debe presionar la tecla de arriba o abajo hasta posicionarse en la opción a configurar, en la figura 7 se observa como la opción en la que nos posicionamos tiene un tamaño de letra mayor y se encuentra debajo del texto “ajuste alarmas” esta opción es la de “DO bajo”.



Figura 7. Navegación por el menú de configuración (Autoría propia.)

Las opciones de configuración que presenta nuestro dispositivo son las siguientes.

3.4.1. DO ALTO.

En esta opción podemos establecer el valor de OD, por encima del cual se activa la alarma de alta concentración de oxígeno disuelto, el rango de valores que se pueden configurar es [8-40] mg/L, para configurar este parámetro colóquese en la opción “DO ALTO” y presione entrar en la figura 8(B) se puede ver el valor inicial que es de 35 mg/L, para cambiar el valor en el cual se activara la alarma se debe presionar la tecla de arriba para aumentar el valor, o la tecla de abajo para disminuir el valor.



Figura 8. (A) opción de configuración DO alto, (B) valor a configurar de DO alto (Autoría propia.)

Para guardar los cambios realizados debe presionar nuevamente la tecla Entrar, como se muestra en la figura 9(B), luego de esta acción le aparecerá el mensaje “Configurar éxito” que confirma que se ha cambiado y almacenado la nueva configuración de manera correcta.

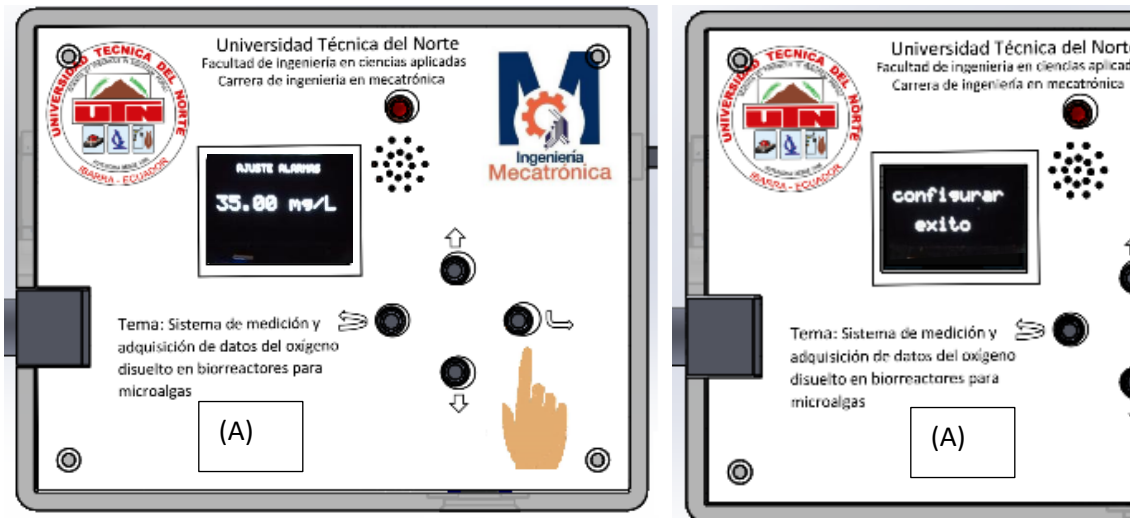


Figura 9. (A) aceptamos valor a configurar, (B) mensaje de confirmación de configuración correcta (Autoría propia.)

De esta manera nuestra alarma se activa cuando se tengan lecturas del OD superiores a 35 mg/L.

Estos pasos se repiten para las demás opciones de configuración con excepción de la opción de calibración, si desea confirmar que los cambios se han realizado con éxito, puede volver a la opción antes configurada y verificar que el valor que nos muestra corresponde al valor antes introducido, esta configuración se mantendrá incluso cuando nuestro dispositivo se apague.

3.4.2. DO BAJO

En esta opción podemos establecer el valor de OD, por debajo del cual se activa la alarma de baja concentración de oxígeno disuelto, el rango de valores que se pueden configurar es [0-8] mg/L

3.4.3. TEMP. ALTO

En esta opción podemos establecer el valor de temperatura, por encima del cual se activa la alarma de alta temperatura, el rango de valores que se pueden configurar es [16-50] °C.

3.4.4. TEMP. BAJO

En esta opción podemos establecer el valor de temperatura, por debajo del cual se activa la alarma de baja temperatura, el rango de valores que se pueden configurar es [3-15] °C.

3.4.5. ALMACENAR

En esta opción podemos establecer cada que intervalo de tiempo almacenaremos datos, se inicia una cuenta regresiva desde que se enciende el dispositivo para realizar el almacenamiento de los datos, el rango de valores que se puede configurar va desde los 15 minutos hasta las 6 horas.

3.4.6. CALIBRAR

En esta opción se realiza la calibración del sensor de OD. Los pasos antes descritos se pueden realizar para todas las opciones de nuestro dispositivo con excepción de la opción de calibración que requiere una serie de pasos previos para poder ejecutarse.

Para determinar si se debe calibrar el dispositivo, se debe observar las lecturas del sensor en la atmosfera o en agua satura al 100% de oxígeno, los valores obtenidos deberán estar en el rango de 8.6 a 9.2 mg/L, si las lecturas no se acercan a los valores antes mencionados se debe realizar la calibración del sensor de OD. El agua saturada al 100% de oxígeno disuelto se consigue bombeando aire con una bomba de pecera por 20 minutos en un volumen de 5 litros de agua.

Luego de verificada la necesidad de realizar la calibración se debe realizar los siguientes pasos.

Paso 1.- Se debe poner el sensor a presión atmosférica, esto se consigue retirando el sensor del fotobiorreactor y dejándolo al ambiente, o exponiendo el fotobiorreactor al ambiente. Realizar la calibración antes de sellar el fotobiorreactor.

Paso 2.- Se debe dejarlo secar por unos minutos hasta que no tenga gotas de agua en la membrana del sensor, se puede liberarse de las gotas de agua con pequeñas sacudidas de la sonda

Paso 3.- Se debe estar en un ambiente con valores de entre 19.5°C y 20.5°C para proceder con el siguiente paso.

Paso 4.- Procedemos a ingresar al menú de configuración y seleccionamos la opción de “calibrar”, esperamos unos segundos y debe de aparecernos el mensaje “calibrar completo”, este mensaje nos muestra que la calibración se realizó de manera exitosa.

Si aparece un mensaje de “calibrar fallo”, se debe repetir los pasos nuevamente. En caso de persistir el mensaje de “calibrar fallo”, puede que el problema sea por la solución electrolítica, en tal caso vaya a la sección de mantenimiento para proceder a llenar de solución electrolítica el sensor y repita los pasos anteriores.

En la figura 10, 11, 12, 13 y 14 podemos los pasos que deberíamos seguir con el dispositivo para realizar la calibración.



Figura 10. Presionar entrar para ingresar al menú de configuración (Autoría propia.)



Figura 11. Navegar en el menú hasta posicionar en la opción calibrar (Autoría propia.)



Figura 12. Una vez posicionado en la opción calibrar, presionar Entrar (Autoría propia.)

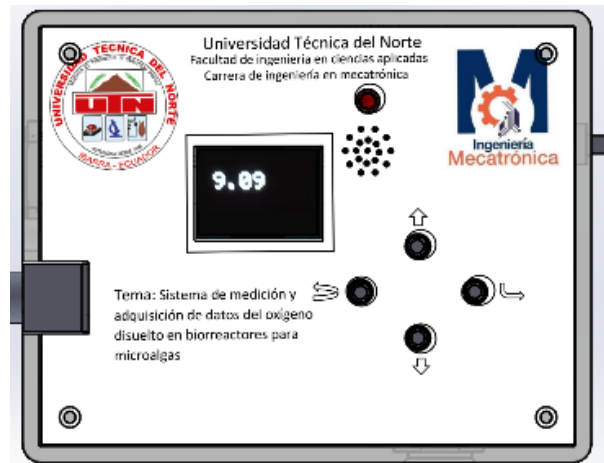


Figura 13 obtendremos valores entre 8.9 y 9.2 mg/L (Autoría propia.)

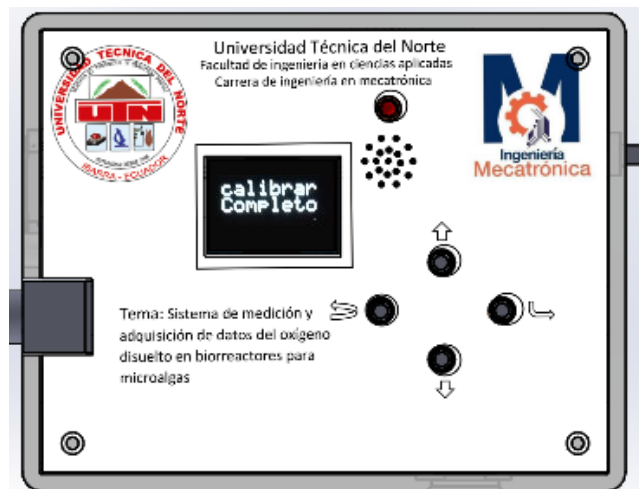


Figura 14. Mensaje de calibración exitosa (Autoría propia.)

El mensaje que nos aparece en la figura 14 nos indica que la calibración se realizó de manera correcta. Para verificar la correcta lectura de los datos se debe realizar mediciones del oxígeno disuelto en agua saturada al 100% de oxígeno a 20°C, en la atmosfera con temperatura de 20°C y se debe tener lecturas cercanas a 9.1 mg/L.

4. MANTENIMIENTO

El tiempo de vida de nuestro sensor es de 5 años, pero cada cierto tiempo se requiere de un mantenimiento.

4.1. Cómo reacondicionar la sonda de oxígeno disuelto a factores de fabrica

Para agregar más solución de electrolito siga estos pasos:

- Desenrosque con cuidado la tapa de la membrana de la sonda.
 - Con la jeringa suministrada, extraiga 2 ml - 5 ml de solución electrolítica.
 - Inserte la jeringa en uno de los cuatro orificios que rodean el cátodo plateado.
 - Inyecte la solución hasta que gotee por uno de los orificios de llenado. Asegúrese de que el cátodo de plata tenga una gota de electrolito, después de llenar la sonda.
- Vuelva a enroscar la tapa de la membrana en la sonda.

En la figura 15 se puede observar de manera gráfica los pasos a seguir para introducir la solución electrolítica.



Figura 15. Pasos para introducir solución electrolítica en la sonda (Autoría propia.)

4.2. Limpieza del sensor de OD

Con el tiempo, las sondas de oxígeno disuelto pueden ensuciarse y cubrirse de depósitos químicos.

Los recubrimientos blandos se pueden quitar cepillando ligeramente los lados de la sonda y la tapa de la membrana. Si es necesario limpiar la membrana de la sonda, use una mezcla de blanqueador suave para eliminar suavemente los depósitos.

NO USE UN CEPILLO PARA LIMPIAR LA MEMBRANA

Si la membrana de la sonda se rompe, debe reemplazarse, ya que provocaría lecturas irregulares.

En la figura 16 se muestra la manera correcta de limpiar la sonda.



Figura 16. Limpieza correcta del sensor (Autoría propia.)

5. Información adicional

Si desea conocer más a fondo la documentación acerca del sensor siga los enlaces que se proporcionan.

Página oficial del dispositivo: <https://n9.cl/3wo8n>

Datos técnicos del circuito acondicionador: <https://n9.cl/ifkx>

Datos técnicos de la sonda de OD: <https://n9.cl/v4872>

Conexión de la sonda en tuberías: <https://n9.cl/ojky>