

## **INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

“INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DEL FOTOBIORREACTOR BIO3L DEL  
LABORATORIO POLO TECNOLÓGICO DEL ITTG PARA PRODUCIR  
BIOCOMBUSTIBLES”

PRESENTA:

**VÁZQUEZ TOLEDO ILCE LISSETH**

**Asesor:**

**Dr. Héctor Ricardo Hernández de León**

DEPENDENCIA:

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ**

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México; Junio del 2018

## Índice General

CAPITULO 1 GENERALIDADES .....	5
1.1 Introducción .....	5
1.2. Información de la institución donde se desarrolló el proyecto.....	7
1.2.1 Historia del ITTG.....	7
1.2.2 Nombre de la Independencia.....	8
1.2.3 Descripción.....	8
1.2.4 Misión .....	9
1.2.5 Visión.....	9
1.2.6 Valores .....	9
1.2.7 Localización.....	9
1.2.8 Área específica relacionada directamente con el proyecto .....	10
1.3 Antecedentes.....	10
1.4 Planteamiento del problema .....	12
1.5 Nombre del Proyecto.....	13
1.6 Objetivos .....	13
1.6.1 Objetivo General.....	13
1.6.2 Objetivos específicos .....	13
1.7. Justificación del proyecto. ....	14
CAPITULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	15
2.1 Introducción de Microalgas .....	15
2.2 Cultivo de microalgas .....	16
2.3 Factores del cultivo de microalgas.....	16
2.4 Sistemas de cultivos de las microalgas.....	19
2.4.1 Sistemas abiertos (estanques).....	19
2.4.2 Sistemas cerrados.....	20
2.5 Tipos de fotobiorreactores.....	21
2.5.1 Fotobiorreactores de tipo panel.....	21
2.5.2 Fotobiorreactores de tipo tubular .....	22
2.5.3 Diseños actuales de fotobiorreactores.....	22

2.6 Programación en Arduino.....	24
2.6.1 Arduino Mega.....	24
2.6.2 Características.....	24
2.7 Sensores Vernier.....	25
2.7.1 Introducción.....	25
2.8 Tipos de Sensores Vernier.....	26
2.8.1 Sensor de Temperatura.....	26
2.8.2 Sensor de CO2 (Sensor de Dióxido de Carbono).....	27
2.8.3 Sensor de gas O2 (Sensor de Oxígeno).....	28
2.8.4 Sensor de Luz y Color.....	29
2.8.5 Sensor de PH.....	31
2.8.6 Sensor Optical DO Probe.....	32
CAPITULO 3 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO.....	33
3.1 Procedimiento y descripción de las actividades.....	33
3.1.1 Estructura del sistema.....	33
3.1.2 Procedimiento de ensamblaje del diseño.....	34
3.1.3 Descripción del Circuito de Control de Luminosidad.....	35
3.1.4 Instalación de las tiras de leds.....	36
3.1.5 Pruebas de funcionamiento del Sistema de adquisición de datos.....	38
3.1.6 Programación del Control de agitación.....	40
4.- Conclusión.....	42
5.- Referencias.....	43

## ABREVIATURAS

FBR: Fotobiorreactor

CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono

LED: (Light-Emitting Diode) diodo emisor de luz.

PWM: (Pulse-Width Modulation) modulación por ancho de pulsos

ITTG: Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

## **CAPITULO 1 GENERALIDADES**

### **1.1 Introducción**

En la actualidad existe una tendencia internacional hacia la búsqueda de combustibles más limpios y nuevas fuentes de energía de baja emisión de carbono, como la energía solar, la térmica, la fotovoltaica, la hidroeléctrica, la geotérmica, la eólica y los biocombustibles, entre otras; las cuales están siendo evaluadas y se encuentran en diferentes fases de estudio y aplicación, cada una con sus propias ventajas y problemas.

El biodiesel ha ido ganando popularidad mundial como fuente de energía renovable debido a sus ventajas económicas, ambientales y sociales. Los cinco principales productores de biodiesel en el mundo son Estados Unidos, Alemania, Francia, Argentina y Brasil.

Dentro de las numerosas fuentes de energías renovables existentes, los biocombustibles son los de mayor interés y juegan un papel muy importante para lo que será la futura infraestructura energética global. Mientras tanto, el biodiesel es uno de los biocombustibles con mayor utilización debido a que es reconocido como una fuente viable de energía primaria. Por consiguiente, el cultivo de microalgas se empieza a considerar un recurso prometedor para la generación de biodiesel, gracias a su rápido crecimiento y capacidad para convertir energía solar en energía química por medio de la fijación de CO<sub>2</sub>.

Los primeros cultivos masivos de microalgas y el uso práctico de su biomasa para aprovechar ciertos componentes tales como lípidos, se remonta a la época de la II Guerra Mundial; período en el que un grupo de científicos del Instituto Carniege de Washington se encargaron de estudiar el comportamiento y la relación de factores influyentes en la eficiencia del crecimiento y cultivo de las microalgas, como por ejemplo la incidencia de luz, la temperatura, el suministro de nutrientes, entre otros. Posteriormente, en la década de los 50s, se postuló que la riqueza en presente en los cultivos de microalgas podría ser aprovechada para obtener alimentos para el ser humano

Con el paso del tiempo, el cultivo constante de microalgas con condiciones controladas parcial o totalmente llevó a un gran desarrollo que se tradujo en diversas posibilidades económicas. En las últimas décadas se ha avanzado enormemente en la producción a gran escala de algas en varios países, mientras que algunas

naciones en vía de desarrollo empiezan a darse cuenta del gran potencial existente en estas tecnologías

Las microalgas han alcanzado una enorme importancia debido, fundamentalmente, a la combinación de usos que pueden tener. Se pueden utilizar con fines energéticos, principalmente para la obtención de biodiésel, aunque también se pueden obtener otros biocombustibles como bioetanol, biometano, biohidrógeno y generar calor y electricidad.

En este proyecto se pretende diseñar y generar un sistema de adquisición de datos del fotobiorreactor BIO3L mediante la identificación de las variables características del proceso (sensores: temperatura, oxígeno disuelto, luz/color, CO<sub>2</sub> y pH; actuadores: motor de agitación, resistencias de calor y luz artificial tipo LED), el cual tendrá una comunicación serial entre el ordenador y la placa microcontroladora para poder obtener los datos en una interfaz gráfica de usuario, dicha interfaz se pretende realizar en Labview.

Por lo tanto, en este proyecto se pretende utilizar sensores Vernier para la obtención de resultados, para datos exactos y precisos en un sistema de adquisición de datos que proporcione el control automático del fotobiorreactor BIO3L.

## **1.2. Información de la institución donde se desarrolló el proyecto**

### **1.2.1 Historia del ITTG**

El Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez es una institución pública dependiente de la Secretaría de Educación Pública. Imparte 9 licenciaturas, 2 maestrías y 2 programas de posgrado en las áreas de Ingeniería, Tecnología y Ciencias Administrativas.

#### Oferta Educativa del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

##### Presencial / Distancia

#### **Licenciaturas**

1. Ing. Mecánica
2. Ing. En Sistemas computacionales
3. Ing. Industrial
4. Ing. Electrónica
5. Ing. Eléctrica
6. Ing. Bioquímica
7. Ing. Química
8. Ing. En Gestión Empresarial
9. Ing. Logística

#### **Maestría**

1. Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica
2. Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica

#### **Doctorados**

1. Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología
2. Doctorado en Ciencias de la Ingeniería

### 1.2.2 Nombre de la Independencia

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez



“Ciencia y tecnología con sentido Humano”

### 1.2.3 Descripción

El Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG); es una universidad pública de tecnología. Es una Institución educativa pública de educación superior, que forma parte del Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos de México.



El Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez fue fundado el 24 de octubre de 1972, se encuentra ubicado en el centro del estado de Chiapas, que por su gran variedad de climas y suelos es propio para el cultivo de muy diversas especies vegetales nativas y adaptadas, con lo que se puede desarrollar la agroindustria, así como muchos otros procesos industriales a partir del gran potencial que ofrece este estado, en el cual el Instituto debe constituirse en el sujeto de cambio, al presentar alternativas de desarrollo sustentable del estado en forma multidisciplinaria.

### 1.2.4 Misión

Formar de manera integral profesionistas de excelencia en el campo de la ciencia y la tecnología con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a los valores éticos.

### 1.2.5 Visión

Ser una Institución de Excelencia en la Educación Superior Tecnológica del Sureste, comprometida con el desarrollo socioeconómico sustentable de la región.

### 1.2.6 Valores

- El Ser Humano
- El Espíritu de Servicio
- El Liderazgo
- El Trabajo en Equipo
- La Calidad
- El Alto Desempeño
- Respeto al Medio Ambiente

### 1.2.7 Localización



**Figura 1.0** Carretera Panamericana Km 1080. Tuxtla Gutiérrez Chiapas, C.P. 29050.

### 1.2.8 Área específica relacionada directamente con el proyecto

El proyecto será realizado en el Laboratorio de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (Edificio I) y en el edificio del Polo Tecnológico de Biocombustibles (Edificio AA).

La carrera de Ingeniería Electrónica tiene como misión “formar profesionales de excelencia con competencias en el ámbito de la Ingeniería Electrónica, motivados para la promoción del desarrollo profesional y el conocimiento científico y tecnológico, con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a los valores cívicos y éticos”.

### 1.3 Antecedentes

Las primeras referencias sobre cultivos puros de microalgas datan de 1890 (Beijerinck, 1890), cuando se consiguió aislar y definir la microalga *Chlorella vulgaris*. A principios del siglo XX Otto Warburg (1883-1970) comienza a emplear cultivos de microalgas para el estudio de la fotosíntesis. Durante la Segunda Guerra Mundial se llevó a cabo la producción de microalgas para generar biomasa lipídica que pudiera utilizarse como proteína.

Durante los años 50 del pasado siglo se llevaron a cabo importantes trabajos en aras de la producción a gran escala. En 1953 se comenzó a experimentar el cultivo a gran escala al aire libre y en invernadero en la ciudad de Essen, al oeste de Alemania aprovechando las grandes cantidades de CO<sub>2</sub> producidas en la industria de la zona. Prácticamente al mismo tiempo se desarrollaron otros prototipos con el mismo objetivo en otras partes del mundo como Tokio, Japón, Stanford, EE.UU, Israel, Trebon, República Checa, entre otros. La institución Carnegie of Washington recopiló todos estos trabajos y añadió algunos más elaborados en la institución en una publicación pionera que sentaba las bases científicas de la producción de microalgas.

Se comienza a pensar en las microalgas como solución parcial a los problemas de carencias proteínicas del mundo debido al elevado contenido en proteína bruta de las mismas, hasta el 50%. Durante este periodo se incrementaron los conocimientos sobre rendimiento, composición química, fijación de nitrógeno, posibilidades de scale-up, entre otros conocimientos, de cultivos de microalgas. De este modo se descubrió que desde hace siglos se han consumido localmente microalgas como fuentes de vitaminas y proteínas: *Spirulina* máxima era

consumida por los aztecas y por los nativos del Chad; distintas especies del género *Nostoc* se comercializan y consumen en Mongolia, Tartaria, China, Ecuador, Fiji, Okinawa, Tailandia y los Andes peruanos; *Phylloderma sacrum* considerada un manjar en Japón; *Oedogonium* y *Spirogyra* se consumen y comercializan en Vietnam e India, y *Prasiola yunnanica* y *Prasiola japónica* se consumen frecuentemente en China y Japón, respectivamente por su altísimo contenido en proteínas.

La producción de biomasa de microalgas se realiza con el fin de obtener productos de valor añadido como aceites esenciales, minerales, vitaminas y glúcidos. La mayor parte de la biomasa producida utilizando microalgas se comercializa como alimento y otra parte es usada para la extracción de pigmentos como el betacaroteno, biofertilizantes, antioxidantes y productos cosméticos producidos por *Dunaliella*, *Arthosphira*, *Chlorella* y *Spirulina*.

La biomasa de microalgas también es empleada en la generación de energía renovable. Entre las especies utilizadas para este fin se encuentran: *Cryptocodinium cohnii*, *Prymnesium parvum*, *Phaedactylum tricornutum*, *Chlorella minutissima*, *Schizochytrium sp.*, y *Scenedesmus dimorphus*. Estas microalgas tienen un contenido lipídico del 22 al 40% del total de su biomasa. A partir de este contenido, las microalgas producen ácidos grasos poliinsaturados, entre ellos triacilglicéridos (TAG), los cuales son útiles para la generación de energía renovable.

En la generación de energía renovable, la productividad de la biomasa de microalgas es mayor que la productividad de la biomasa vegetal. Esto se debe a los bajos costos de producción que supone mantener a la biomasa microalgal. Las microalgas necesitan menos espacio para crecer que las plantas y pueden crecer en varios sistemas de cultivo. Los sistemas de cultivo más empleados son los sistemas abiertos y los fotobiorreactores, ya que permiten aumentar la eficiencia de la producción. A partir de la primera semana de funcionamiento, estos sistemas de cultivo permiten recuperar alrededor del 50% de la producción total de la biomasa, algo que no ocurre en la generación de biomasa vegetal.

Además de su productividad, las microalgas tienen mayor eficiencia fotosintética; el modelo de crecimiento es exponencial, en comparación al modelo lineal de crecimiento de las plantas. El tiempo de adaptación a un medio de cultivo es como promedio de 8 días en comparación al tiempo de adaptación de las plantas que es de alrededor de 1 mes.

#### 1.4 Planteamiento del problema

Frente al incremento de la población y sus necesidades, el descubrimiento de fuentes sustentables de recursos se tornó en un requerimiento imperioso. Asimismo, los ambientes acuáticos han sido y siguen siendo fuente de alimentos, minerales y otros productos naturales. La biomasa microalgal y los metabolitos obtenidos a partir de ella representan trascendentales recursos con beneficios potenciales en diferentes áreas.

Las microalgas son fuentes interesantes de una gran cantidad de compuestos o sólo tienen la capacidad de producir compuestos de alto valor comercial sino también la habilidad de crecer rápidamente utilizando luz solar, dióxido de carbono y nutrientes obtenidos del cuerpo de agua donde crecen.

La obtención de biomasa microalgal y la de productos derivados puede resultar de interés comercial si es optimizada mediante la modificación de las condiciones físicas y de la composición de los medios de cultivo utilizados para su producción.

La principal novedad de los sensores Vernier cuenta con tecnología inalámbrica que se utilizan en la producción de biocombustible se han basado para la obtención de datos o medidas específicas para que estas sean más precisas y exactas.

Por lo que con la implementación de una instrumentación electrónica nos permite la visualización y recolección de los datos de los sensores que son obtenidos en la producción de las microalgas además poder graficar y analizar los resultados.

Lo cual se ha diseñado e implementado el prototipo de un fotobiorreactor para el cultivo de microalgas para producir biocombustible, optimizando sus siguientes parámetros: materiales de construcción, temperatura, oxígeno disuelto, luz/color, CO<sub>2</sub> y pH; actuadores: motor de agitación, resistencias de calor y luz artificial tipo LED. Además, demostrar la productividad de un innovador sistema de mezclado y el estudio del cultivo bajo distintas intensidades luminosas.

## 1.5 Nombre del Proyecto

“Instrumentación electrónica del fotobiorreactor BIO3L del Laboratorio Polo Tecnológico del ITTG para producir biocombustibles “

## 1.6 Objetivos

### 1.6.1 Objetivo General

Diseñar, construir una interfaz electrónica y generar un sistema de adquisición de datos del fotobiorreactor BIO3L para producir biocombustible a partir de microalgas

### 1.6.2 Objetivos específicos

1. Conocer la teoría básica y estado del arte de los fotobiorreactores para producir biocombustible a partir de microalgas
2. Diseñar y construir una interfaz electrónica aplicada al fotobiorreactor para producir biocombustible a partir de microalgas mediante la identificación de las variables características del proceso (sensores: temperatura, oxígeno disuelto, luz/color, CO<sub>2</sub> y pH; actuadores: motor de agitación, resistencias de calor y luz artificial tipo LED).
3. Integrar a los sensores y actuadores en un sistema de adquisición de datos que proporcione el control automático del fotobiorreactor BIO3L
4. Desarrollar un procedimiento de pruebas de funcionamiento del sistema de adquisición de datos aplicado al fotobiorreactor BIO3L.

### 1.7. Justificación del proyecto.

El Biodiesel es una fuente de energía renovable que proporciona una garantía para la economía de los países al mismo tiempo que permite lograr un entorno verde sustentable. El uso combustible actual, en el sector transporte principalmente, es dependiente de combustibles derivados del petróleo y es ya insostenible debido al agotamiento de los suministros y a su comprobable daño al planeta en el cambio climático y por la emisión de gases contaminantes, como los de efecto invernadero. Por lo que existe la necesidad urgente de reducir estas emisiones y así evitar el calentamiento global.

Los biocombustibles a partir de microalgas son tecnologías que permitirán dar respuesta a las necesidades de combustibles líquidos de forma sustentable y contribuir a la seguridad energética local, regional y mundial. El biodiesel es biodegradable y durante su combustión produce menos emisiones nocivas. Además, las microalgas son microorganismos con mayor eficiencia fotosintética que los cultivos terrestres, y con esto contribuyen a la disminución de CO<sub>2</sub> de la atmósfera.

Finalmente, las microalgas se pueden cultivar en terrenos no aptos para otros fines con agua que no se puede utilizar para la producción de alimentos. Además de utilizar tierras no cultivables y no requerir el uso de agua dulce, también podrían producir mayores volúmenes de biocombustibles por hectárea que otras fuentes. Por todo ello, las microalgas se están convirtiendo en una fuente muy prometedora de biocombustible en un futuro inmediato y parecen ser la única fuente de biocombustible renovable capaz de satisfacer la demanda mundial de combustibles para el transporte.

Por lo que, serán necesarios avances científicos y sistemas de control electrónicos para asegurar que los biocombustibles basados en la citada oleaginosa puedan ser producidos con el beneficio ambiental deseado de emisiones de gases de efecto invernadero.

## **CAPITULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.1 Introducción de Microalgas**

Se conoce como microalgas al conjunto de microorganismos unicelulares eucariotas y procariontes (cianobacterias) que sintetizan una gran cantidad de clorofila a y otros pigmentos que define su coloración verde, les permite realizar la fotosíntesis y actuar como productores primarios en la generación de energía química a partir de energía lumínica; varían en cuanto a tamaño, toxicidad, grosor de la pared celular, movilidad y composición química.

Las microalgas son microorganismos que se encuentran en diversos ambientes naturales y presentan varios tipos de adaptaciones para su crecimiento por lo que pueden vivir en agua dulce o salada. Existen alrededor de 300.000 especies de microalgas, pertenecen al reino Plantae y sus divisiones son: Cryptophyceae, Dinophyceae, Prymnesiophyceae, Chrysophyceae, Bacillariophyceae, Dictyochophyceae, Euglenophyceae y Chlorophyceae.

Las condiciones necesarias de temperatura, nutrientes, pH, presión, salinidad, aireación y concentración de CO<sub>2</sub> en los medios de cultivo varían entre especies e influyen en la cantidad de biomasa final generada en un tiempo determinado.

El cultivo de microalgas puede ser desarrollado en condiciones extremas o normales, dependiendo de la especie en estudio los requerimientos nutricionales varían. Las estrategias que utilizan las microalgas para adaptarse a las condiciones extremas son varias. Entre las más importantes se puede mencionar: la producción de sustancias mucilaginosas extracelulares para protegerse del estrés hidrodinámico, la acumulación de moléculas osmorreguladoras en condiciones salinas, la síntesis de pigmentos fotoprotectores para la respuesta a altas intensidades de luz; y la acumulación de lípidos en condiciones limitadas de nitrógeno.

Además de las estrategias de supervivencia que tienen algunas especies de microalgas, las condiciones extremas evitan la contaminación de los cultivos en producción a gran escala, puesto que los cultivos se convierten en selectivos, y de esta manera impiden el crecimiento de otras microalgas que puedan generar competencia en el sistema de cultivo. Las especies de microalgas que no crecen en medios

selectivos desarrollan estrategias de crecimiento diferentes a las microalgas extremófilas y por lo tanto es importante estudiar la influencia que ciertos factores

tienen sobre el crecimiento celular; dichos factores podrían ser: cantidad de luz recibida, concentración de CO<sub>2</sub> suministrada, pH, temperatura del cultivo y sistema de producción.

## 2.2 Cultivo de microalgas

Para el cultivo de las microalgas, es necesario el estudio de varios factores. El primer factor es el requerimiento nutricional de la microalga para su crecimiento. En este desempeña un papel fundamental la fuente de carbono y la intensidad de luz que aprovecha la microalga para realizar fotosíntesis.

El segundo factor es el modo de operación en el que va a trabajar el sistema de cultivo. Para este caso se debe decidir si el modo discontinuo es más adecuado que el modo continuo para la producción de una determinada concentración de microalgas.

El tercer factor es el sistema de cultivo. Es necesario reconocer qué sistema es más eficaz para la producción de un determinado volumen de biomasa microalgal y tener claras cuáles son las desventajas y las ventajas que aportan los sistemas abiertos frente a los sistemas cerrados o viceversa.

Finalmente, el diseño de un sistema de cultivo bajo un modo de operación es uno de los principales factores que necesitan ser evaluados y optimizados. El diseño óptimo de un sistema abarca criterios de luz, burbujeo, control de temperatura y control de pH, y le permite a la microalga alcanzar la mayor concentración de biomasa al final del tiempo de crecimiento

## 2.3 Factores del cultivo de microalgas

Las microalgas requieren para su correcto crecimiento un balance adecuado de diferentes nutrientes y condiciones ambientales.

Son varios factores influyentes en el cuidado de las microalgas, ya que estos estimulan el comportamiento celular de la microalga. Igualmente es elemental examinar todas las variables involucradas en el cultivo, tales como:

## Luz

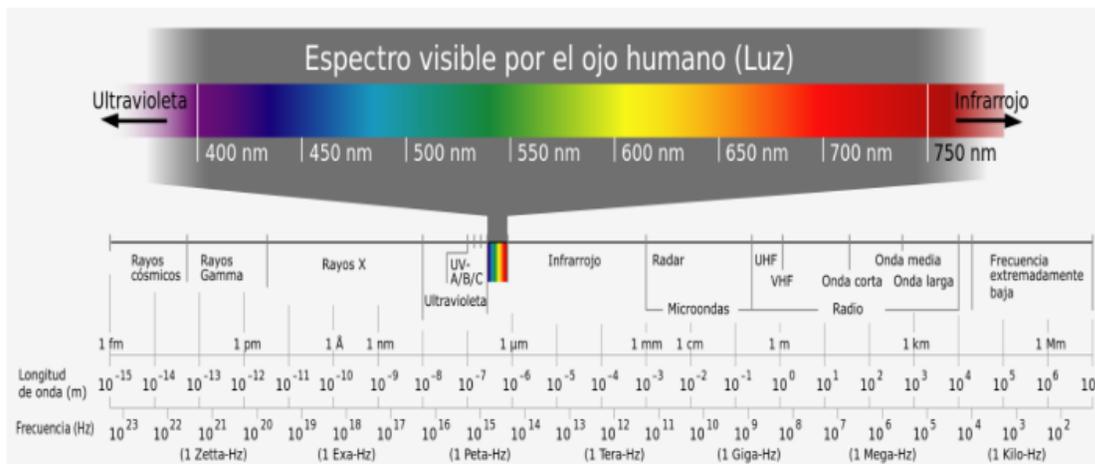
La intensidad de la luz es uno de los factores más importantes para el crecimiento fotosintético de las microalgas. Los sistemas de cultivos de microalgas pueden ser iluminados por luz artificial, luz solar o ambas. Entre los sistemas de cultivo de algas con iluminación natural con grandes áreas de iluminación se encuentran los estanques abiertos, los llamados platos planos o flat plates, los airlift tubulares o de tipo serpentín y los de tipo inclinado, entre otros.

Los sistemas de biorreactores empleados a nivel laboratorio son iluminados interna o externamente por luz artificial con lámparas fluorescentes y diodos emisores de luz (light emitting diodes, LED) entre otros.

## Intensidad

La tasa fotosintética y la intensidad lumínica se relacionan por medio de una cinética de Michaelis-Menten (Figura 2.0). La tasa fotosintética aumenta con la intensidad hasta el punto de saturación, que varía en función de la especie y las condiciones ambientales. A partir del punto de saturación lumínica la tasa fotosintética se mantiene constante hasta un nivel en el que empieza a descender.

A intensidades bajas el crecimiento está limitado por la falta de luz, en este punto la eficiencia en el aprovechamiento de la luz es muy alta, toda la luz incidente se aprovecha en la fotosíntesis. Las microalgas que se desarrollan a bajos niveles de intensidad lumínica presentan una cantidad mayor de pigmentos fotosintéticos por lo que son más eficientes en el aprovechamiento de la luz



**Figura 2.0 Espectro electromagnético de la radiación solar y detalle del espectro visible.**

## **Burbujeo**

El burbujeo, la aireación o el mezclado pueden ser realizados mediante el empleo de paletas como en el caso de los fotobiorreactores de tipo carrusel, o por medio de bombas como en el caso de los fotobiorreactores de tipo panel y de tipo tubular. Esto facilita el intercambio gaseoso entre el cultivo y la atmósfera.

El mezclado evita la sedimentación de las microalgas y le permite a cada célula el acceso a la zona fótica. Cuando se optimiza el mezclado los fotobiorreactores pueden generar productividades altas debido a que el intercambio gaseoso es adecuado

## **Temperatura**

La producción algal aumenta proporcionalmente con la temperatura hasta alcanzar la temperatura óptima de cada especie. Por encima de esta, aumenta la respiración y la fotorrespiración reduce la productividad global. La temperatura óptima varía entre las especies, pero en general está entre 28° y 35°C.

En un sistema de cultivo cerrado, la temperatura se puede controlar por varios mecanismos, tales como rociadores de agua, inmersión del colector solar en piscinas, reactor dentro de un invernadero, etc. Por el contrario, en un sistema de cultivo abierto es muy difícil de controlar, aunque se pueden realizar ciertas acciones simples para disminuir el efecto, como cubrir los estanques con plásticos transparentes.

## **PH**

Las microalgas tienen diversos requerimientos de pH para su crecimiento. A niveles de pH alcalinos, la disponibilidad de CO<sub>2</sub> puede ser limitante para el crecimiento y la fotosíntesis de microalgas. El rango de pH para la mayoría de los cultivos de microalgas está entre 7 y 9, con un rango óptimo de 8.2 a 8.7. Un pH óptimo en el cultivo generalmente es mantenido gracias a la aeración con aire enriquecido con CO<sub>2</sub>. En el caso de los cultivos de alta densidad celular, la adición de dióxido de carbono corrige un incremento del pH, el cual puede llegar a un valor límite de 9 para el crecimiento de la microalga.

Algunos autores coinciden que el crecimiento de las microalgas es óptimo a un pH neutro de 7.5. Por lo general, soluciones amortiguadoras son añadidas a los medios de cultivo con la finalidad de ajustar y mantener el pH del medio. El pH se incrementa

conforme la edad del cultivo es mayor, esto es debido a la acumulación de minerales y a la oxidación de nutrimentos. Por lo tanto, es recomendado que el pH inicial del medio de cultivo se ajuste a 6.5 antes de ser inoculado.

## **2.4 Sistemas de cultivos de las microalgas**

Los fotobiorreactores son biorreactores que aprovechan la luz solar o artificial para el crecimiento de las microalgas, pueden ser sistemas abiertos o cerrados y pueden tener modo discontinuo o continuo de operación. El primer postulado sobre biorreactores para la producción de biomasa de microalgas se realizó en 1950, donde se deseaba emplear la luz solar y el agua marina para obtener cultivos masivos de microalgas con el fin de alimentar al ser humano.

Los criterios comunes de diseño de un fotobiorreactor son aquellos que resultan en una alta productividad volumétrica y conversión de energía lumínica de forma económicamente viable. Un FBR eficiente no se puede diseñar sin los adecuados conocimientos del comportamiento de los organismos durante su cultivo. Puesto que los organismos fotótrofos presentan gran diversidad en cuanto a morfología, requerimientos nutritivos y de luz y resistencia a diferentes tipos de estrés, los FBR deben ser diseñados para un organismo y unas condiciones ambientales concretas. Los principales criterios de diseño son: relación superficie iluminada/volumen del reactor, orientación e inclinación, sistemas de mezcla y desorción de gases, sistemas de limpieza y de regulación de la temperatura, transparencia y durabilidad del material. Facilidad de operación y de escalado, así como bajos costes de construcción y operación son también de particular importancia para los fotobiorreactores comerciales.

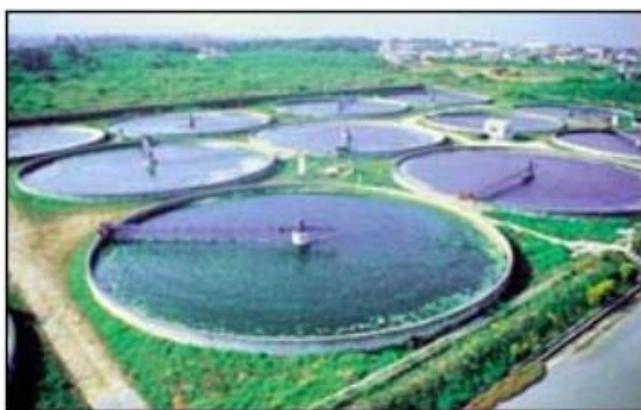
### **2.4.1 Sistemas abiertos (estanques)**

Toda la producción comercial de microalgas que se está realizando en este momento, salvo pequeñas excepciones, se está cultivando en este tipo de sistemas. Las razones principales son la facilidad de construcción y operación, su bajo coste y su mayor durabilidad. Sin embargo, las mayores limitaciones de los sistemas abiertos incluyen la mala accesibilidad de las células a la luz, las pérdidas por evaporación, el uso de grandes extensiones de terreno y la contaminación del cultivo por depredadores y otros organismos heterótrofos de rápido crecimiento.

En los fotobiorreactores inclinados el cultivo va descendiendo, resbalando por una superficie inclinada, creando gran turbulencia y una fina capa de cultivo. Las desventajas son las típicas de los sistemas abiertos, añadiendo el coste energético de bombear el cultivo de nuevo a la parte superior. En los estanques circulares como

se muestra en la Figura 3.0 (a), la agitación se realiza mediante una pala que gira recorriendo toda la superficie.

A pesar de ser costosos en su construcción y operación, son muy usados en Japón, Taiwán e Indonesia para la producción de *Chlorella*. Por último, los estanques tipo Raceway Figura 3.0 (b), consisten en una cavidad escavada en el suelo, con una profundidad de 15-20 cm, cubierta con plástico para evitar percolación. El estanque se divide en dos canales y la circulación y agitación del cultivo se realiza mediante paletas giratorias, que además hacen circular el cultivo a lo largo del estanque.



(a) Estanques circulares



(b) Raceway

**Figura 3.0** Tipos de fotobiorreactores abiertos: (a) sistemas circulares y (b) tipo raceway.

#### 2.4.2 Sistemas cerrados

Los fotobiorreactores cerrados se caracterizan por la regulación y control de casi todos los parámetros importantes, al mismo tiempo que reducen el riesgo de contaminación y las pérdidas de CO<sub>2</sub>. Además, éstos permiten condiciones de cultivo reproducibles, control de temperatura y diseño flexible. En estos equipos, la luz no incide directamente en las células, sino que atraviesa unas paredes transparentes para llegar hasta ellas. Por ello en los FBR cerrados el intercambio directo de gases entre el cultivo y la atmósfera suele estar fuertemente limitado. La principal consecuencia es la acumulación de oxígeno en su interior. Las posibilidades técnicas de un FBR cerrado son mucho mayores que las de los sistemas abiertos.

Los fotobiorreactores pueden ser clasificados según su diseño y modo de operación. En cuanto a diseño, los reactores pueden ser: (a) planos o tubulares, (b) horizontales, verticales, inclinados o espirales, (c) serpentines (tubos acodados, circulación en serie) o múltiples (circulación en paralelo desde un colector repartidor

a uno recogedor). Desde el punto de vista del modo de operación, los FBR pueden clasificarse como: (d) impulsados/agitados por aire o por bombas y (e) reactores de una fase (el intercambio de gases se produce en una cámara separada) o de dos fases (no existe cámara de intercambio de gases, sino que éste se produce a lo largo de todo el reactor).

## 2.5 Tipos de fotobiorreactores

### 2.5.1 Fotobiorreactores de tipo panel

Es un tipo de biorreactor cerrado que emplea luz solar como parte de su funcionamiento para el crecimiento de microalgas y su modo de operación puede ser continuo o discontinuo. Los fotobiorreactores de tipo panel tienen una mezcla uniforme cuando el burbujeo es firme y una alta eficiencia en el uso de la luz proporcionada por el operador además de un fácil control de temperatura, y una alta transferencia gaseosa



**Figura 4.0 Fotobiorreactor de Tipo panel**

### 2.5.2 Fotobiorreactores de tipo tubular

Este tipo de fotobiorreactor fue propuesto por primera vez por Tamiya en 1950, y estudiado por varios autores. Los fotobiorreactores de tipo tubular son un sistema cerrado que utiliza tramos de tubería de forma horizontal o vertical y tienen las mismas cualidades y beneficios que los fotobiorreactores de tipo panel.

Existen algunas diferencias entre los fotobiorreactores de tipo panel y de tipo tubular. Entre ellas podemos mencionar la superficie de iluminación, el control de temperatura y la influencia de la luz en la fotoinhibición de una microalga. Este fenómeno se genera en la zona fótica a causa de problemas en la optimización del burbujeo de gas.



**Figura 5.0 Fotobiorreactor de Tipo tubular**

### 2.5.3 Diseños actuales de fotobiorreactores

Existen diversos factores que influyen ampliamente en el cultivo de microalgas y determinan el diseño del reactor a emplear. La baja densidad celular origina varios inconvenientes, incluyendo baja productividad, fácil contaminación, costosa recuperación del producto de medios diluidos y dificultad para el control de la temperatura en los sistemas de cultivo cerrados. Estos inconvenientes estimularon el desarrollo de fotobiorreactores construidos con materiales transparentes como vidrio y policarbonato, entre otros materiales.

Los primeros FBR fueron propuestos por Gudín y Chaumont (1983), Pirt y col., (1983), y Torzillo y col., (1986). En la última década los fotobiorreactores tubulares y de placas planas han recibido mucha atención ya que permiten establecer cultivos

de alta densidad celular, tres o más veces en comparación con los sistemas convencionales. Enseguida se enlistan las principales ventajas que ofrecen este tipo de cultivo de microalgas:

1. Facilidad para cosechar la biomasa.
2. Mantenimiento del cultivo sin contaminación.
3. Mejor control de las condiciones de cultivo.
4. Menor inversión de capital en el fotobiorreactor.

Este último factor es un elemento importante en el costo de producción de productos derivados de microalgas. Actualmente existen diversos tipos de fotobiorreactores disponibles, entre los cuales se encuentran las columnas de burbujeo, los reactores airlift y los tanques agitados, así como los de tipo tubular y cónico. Los FBR son generalmente categorizados de acuerdo con su estructura y su producción de biomasa, de los cuales los tubulares, los de superficie plana (flat panel) y las columnas verticales son los más comunes.

Los fotobiorreactores de tipo tubular son el diseño más sustentable para cultivos en sistemas cerrados tienen una gran área de iluminación con una buena tasa de producción de biomasa y son relativamente económicos puesto que son construidos en vidrio o plástico. El diseño de tipo flat-plate son generalmente construidos con materiales transparentes con la finalidad de maximizar el empleo de la luz solar. Este tipo de reactores permite una buena inmovilización de las microalgas y una sustentable utilización de la energía, además de un fácil mantenimiento y limpieza.

Los diseños de tipo columna vertical son compactos, económicos y fáciles de operar, lo que los hace factibles al escalamiento. Otro diseño de fotobiorreactores que cuenta con una amplia superficie de iluminación es el denominado flat-panel o fotobiorreactor de superficie plana, este tipo de diseño permite una mejor trayectoria incidente de la luz en el cultivo facilitando los ciclos de luz-oscuridad, aumentando la producción de biomasa y otros compuestos en las microalgas.

## 2.6 Programación en Arduino

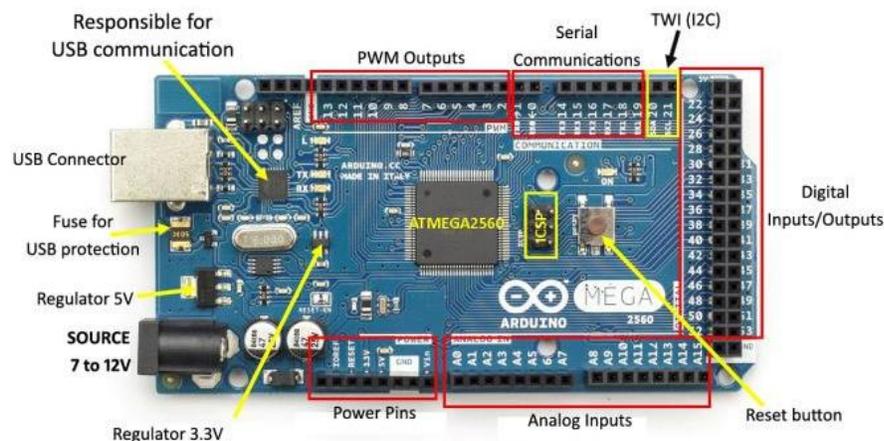
### 2.6.1 Arduino Mega

El Arduino Mega es una tarjeta de desarrollo basada en el ATmega2560. Tiene 54 pines de entrada/salida digital (de los cuales 14 pueden ser usados como salidas de PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos seriales), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un conector para ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para usar el microcontrolador, basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o energizarlo con una fuente de poder o batería para comenzar a usarlo.

### 2.6.2 Características

- Microcontrolador: ATmega2560
- Tensión de alimentación: 5V
- Tensión de entrada recomendada: 7-12V
- Límite de entrada: 6-20V
- Pines digitales: 54 (14 con PWM)
- Entradas analógicas: 16
- Corriente máxima por pin: 40 mA
- Corriente máxima para el pin 3.3V: 50 mA
- Memoria flash: 256 KB
- SRAM: 8 KB
- EEPROM: 4 KB
- Velocidad de reloj: 16 MHz

A continuación, se muestra en la figura 2.0 los elementos que componen la placa de Arduino Mega 2560



**Figura 6.0** Arduino Mega 2560

## 2.7 Sensores Vernier

### 2.7.1 Introducción

Los sensores Vernier son una tecnología robusta y probada que es fácil de usar. Nuestros sensores proporcionan resultados consistentes y de alta calidad para las demandas de la instrucción de los estudiantes.

#### Acerca de Sensores Vernier



Go Direct®

Los sensores Go Direct se conectan directamente a Chromebooks, dispositivos móviles o computadoras. Incluyen conectividad USB e inalámbrica.



LabQuest®

Los sensores de LabQuest requieren una interfaz para enviar datos del sensor al software de recopilación y análisis de datos en varias plataformas.



USB

Los sensores USB se conectan directamente a una computadora, Chromebook o LabQuest 2. No se requiere interfaz de sensor.



## Inalámbrico

Los sensores inalámbricos se comunican directamente con dispositivos móviles y LabQuest 2. No se requiere interfaz de sensor.

## 2.8 Tipos de Sensores Vernier

### 2.8.1 Sensor de Temperatura

La sonda de temperatura Directa Go es un sensor de temperatura robusto y de uso general que los estudiantes pueden usar para monitorear la temperatura. Se conecta Directamente de forma inalámbrica a través de Bluetooth® o por cable a través de su conector USB a su dispositivo



**Figura 7.0 Sensor de Temperatura**

### Descripción

Esta sonda robusta de temperatura Go Direct proporciona a los estudiantes la ventaja de tener una conectividad en cualquier lugar. Debido a que también es resistente al agua, la sonda de Temperatura Go Direct es más duradera que los sensores que son simplemente resistentes al agua.

La sonda de temperatura Go Direct puede utilizarse en una variedad de experimentos:

- Realizar reacciones endotérmicas y exotérmicas.
- Investigar la congelación y el derretimiento del agua.

- Medir el contenido energético de los alimentos.
- Examinar la absorción de la energía radiante.
- Monitorear las condiciones ambientales

### Especificaciones

- Rango de Temperatura:  $-40$  a  $125^{\circ}\text{C}$
- Rango de Temperatura del mango:  $-10$  a  $45^{\circ}\text{C}$
- Resolución:  $0.07^{\circ}\text{C}$
- Conexiones: Inalámbrica: Bluetooth y Cableada: USB

### 2.8.2 Sensor de CO<sub>2</sub> (Sensor de Dióxido de Carbono)

Mide niveles de dióxido de carbono gaseosos controlando la cantidad de radiación infrarroja absorbida por las moléculas de dióxido de carbono. **Muy importante: No ponga el sensor directamente en ningún líquido.** El sensor está diseñado sólo para medios gaseosos, no mide concentración de CO<sub>2</sub> acuosa.



**Figura 8.0 Sensor de CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)**

Tiene dos configuraciones: Low range (0–10,000 ppm) y High range (0–100,000 ppm). Los estudiantes pueden usar el CO<sub>2</sub> Gas Sensor para medir el cambio en los niveles de dióxido de carbono en una variedad de sistemas, incluyendo:

- Una cámara que contiene animales pequeños tales como grillos, gusanos, o haciendo germinar semillas
- Un terrario de plantas experimentando ciclos de respiración y fotosíntesis.
- Un aula.
- Una atmósfera cercada que contiene hidróxido de sodio o hidróxido de potasio como basureros de CO<sub>2</sub>.
- La reacción química entre ácido clorhídrico y bicarbonato de sodio.
- El gas dióxido de carbono difundándose por un tubo de difusión de gas.

- Fermentación de azúcares
- Respiración humana bajo varias condiciones (en reposo v. después del ejercicio)

### 2.8.3 Sensor de gas O<sub>2</sub> (Sensor de Oxígeno)

Este sensor se utiliza para controlar niveles de oxígeno gaseoso en una gran variedad de experimentos de biología y química. **Muy importante:** No sumerja el sensor en ningún líquido. El sensor está fabricado sólo para medir en medios gaseosos, no la concentración de O<sub>2</sub>, acuosa.



Figura 9.0 Sensor de Oxígeno

Experimentos típicos para el sensor de O<sub>2</sub>

- Controle la concentración de oxígeno en la respiración humana.
- Mida la concentración del gas oxígeno generada durante la descomposición del agua oxigenada por catalasa.
- Controle los cambios en la concentración de oxígeno durante fotosíntesis y respiración de plantas.
- Controle la respiración de animales, insectos, o haciendo germinar semillas.
- Controle la oxidación de metales.
- Controle el consumo de oxígeno por la oxidación de la levadura.

### Especificaciones

- Rango de medición: 0-27% (0-270 ppt)
- Precisión (@ Presión estándar 760 mm Hg): +/- 1% volumen O<sub>2</sub>
- Resolución típica: 0.01%
- Tiempo de respuesta: ~ 12 segundos al 90% del valor final

- Tiempo de calentamiento: menos de 5 segundos al 90% del valor final
- Efecto de presión:
  - Directamente proporcional
  - $V_{out} = V_{out} \text{ (estándar)} \times (P / 1013)$
  - Rango de presión: 0.5 atm a 1.5 atm
- Rango de señal de salida: 0 a 4.8 VDC; 2.7 a 3.8 VDC @ 21% O 2
- Impedancia de salida: 1 K $\Omega$
- Voltaje de entrada: 5 VDC +/- 0.25 VDC
- Modo de muestreo de gas: Difusión
- Rango de temperatura de funcionamiento normal: 25 ° C ( $\pm$  5 ° C)
- Rango de temperatura de funcionamiento: 5 a 40 ° C (con calibración)
- Rango de Humedad de Funcionamiento: 0 a 95% HR
- Rango de temperatura de almacenamiento: -20 a + 60 ° C
- Dimensiones:
  - Tubo del sensor: 45 mm de longitud, 28 mm de diámetro exterior; longitud total: 120 mm

#### 2.8.4 Sensor de Luz y Color

El sensor de luz y color Go Direct es un sensor de luz potente y versátil que mide la luz en el espectro electromagnético visible a ultravioleta. Un sensor de color RGB detecta las contribuciones relativas de los colores primarios en la luz. Va la luz directa y el color se conecta directamente de forma inalámbrica a través de Bluetooth® o cableados a través de USB a su plataforma.



**Figura 10.0 Sensor de Luz y Color**

### **Sensor de luz visible**

La velocidad de muestreo rápida para el sensor de luz visible (1000 Hz) le permite observar el parpadeo de las lámparas fluorescentes.

### **Sensor de color rojo, verde, azul (RGB)**

Use el sensor RGB para determinar la contribución relativa de la luz roja, verde y azul. Un LED blanco incorporado proporciona una iluminación uniforme cuando el sensor se coloca directamente sobre una superficie, reduciendo el efecto de la luz ambiental variable.

### **Sensor UV**

Ideal para experimentos que usan luz solar y lámparas UV, el sensor UV responde bien a la radiación ultravioleta en el espectro UVA y UVB.

El sensor de luz directa y color Go puede usarse en una variedad de experimentos:

- Explore la intensidad de la luz en función de la distancia.
- Llevar a cabo estudios de filtros polarizados.
- Observe el parpadeo de las lámparas fluorescentes.
- Realice estudios de reflectividad, incluido el análisis de color.

### **Especificaciones**

#### Sensor de luz visible

- Longitudes de onda: 400-800 nm
- Rango: 0 a 150,000 lux
- Velocidad máxima de muestreo: 1,000 Hz

#### Sensor UV

- Sensible a las longitudes de onda UVA y UVB
- Velocidad máxima de muestreo: 1 Hz

#### Sensor RGB

- Respuesta máxima: pico de 615 nm (rojo); Pico de 525 nm (verde); Pico de 465 nm (azul)
- Velocidad máxima de muestreo: 0.5 Hz

### 2.8.5 Sensor de PH

El sensor de pH Go Direct es un sensor importante y versátil para actividades de laboratorio y campo por igual. Les da a los estudiantes la libertad de explorar el pH sin la inconveniencia de los cables: no más soluciones derramadas o cables colgantes. El pH Go Direct transmite lecturas en vivo y captura datos en tiempo real.



**Figura 11.0 Sensor PH**

Use este sensor en una variedad de experimentos:

- Llevar a cabo valoraciones ácido-base.
- Controle el cambio de pH durante las reacciones químicas.
- Pruebe el pH y la alcalinidad de los cuerpos de agua.
- Investigar ácidos y bases en el hogar.

Este sensor se compone de un electrodo de pH conectado a un amplificador directo de electrodos a través de un conector BNC. Este diseño le permite utilizar el amplificador directo de electrodos Go con otros electrodos Vernier, como el electrodo plano de pH, el electrodo ORP, el electrodo ISE o un electrodo de un tercero.

#### Especificaciones

- rango de pH: 0-14
- Precisión con el nuevo electrodo (pH):  $\pm 0.2$
- Tipo: cuerpo epóxico, sellado, lleno de gel, referencia de Ag / AgCl
- Diámetro del eje: 12 mm OD
- Solución de almacenamiento: solución de pH-4 / KCl (10 g de KCl en 100 ml de solución buffer pH-4)
- Conexiones:
  - Inalámbrico: Bluetooth
  - Alámbrico: USB

### 2.8.6 Sensor Optical DO Probe

La sonda óptica DO Vernier utiliza tecnología luminiscente para proporcionar resultados rápidos, fáciles y precisos, lo que la convierte en una excelente elección para cursos de biología, ecología o ciencias ambientales. Los estudiantes pueden medir la concentración de oxígeno disuelto en aguas superficiales o realizar una amplia variedad de experimentos para determinar los cambios en los niveles de oxígeno disuelto, uno de los principales indicadores de la calidad de un entorno acuático



**Figura 12.0 Sensor Optical DO Probe**

- Tecnología plug-and-play: no es necesaria una solución de llenado, tiempo de calentamiento, agitación o calibración
- Compensación de temperatura y presión incorporada
- Fácil mantenimiento
- Cambiar la configuración para medir en unidades de mg / L o % de saturación

#### Especificaciones

- Rango: 0 a 20 mg / L (o ppm ), 0 a 300%
- Exactitud:
  - mg / L
    - $\pm 0.2$  mg / L por debajo de 10 mg / L
    - $\pm 0.4$  mg / L por encima de 10 mg / L
  - %
    - $\pm 2\%$  por debajo del 100%
    - $\pm 5\%$  por encima del 100%
- Tiempo de respuesta: 90% de la lectura final en 40 segundos
- Resolución típica: 0.006 mg / L
- Compensación de temperatura: automático de 0-50 ° C
- Compensación de presión: automática de 228 mmHg a 1519 mmHg
- Flujo de muestra mínimo: ninguno

## CAPITULO 3 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

### 3.1 Procedimiento y descripción de las actividades

#### 3.1.1 Estructura del sistema

Para el diseño del fotobiorreactor se usó un sistema de cultivo cerrado y de tipo tubular de volumen 10 L. ya que su forma cilíndrica ayuda a distribuir la luz y soporta bien la presión en la base y además que nos permiten mantener al cultivo totalmente aislado del medio ambiente exterior.



Figura 13.0 Diseño del fotobiorreactor

### 3.1.2 Procedimiento de ensamblaje del diseño

Para el ensamble correspondiente se usaron estructuras metálicas como base para el fotobiorreactor, el diseño de tapa en SolidWorks como soporte de los sensores que nos permite el censado cuya finalidad de adquirir y almacenar datos (Figura 15.0)

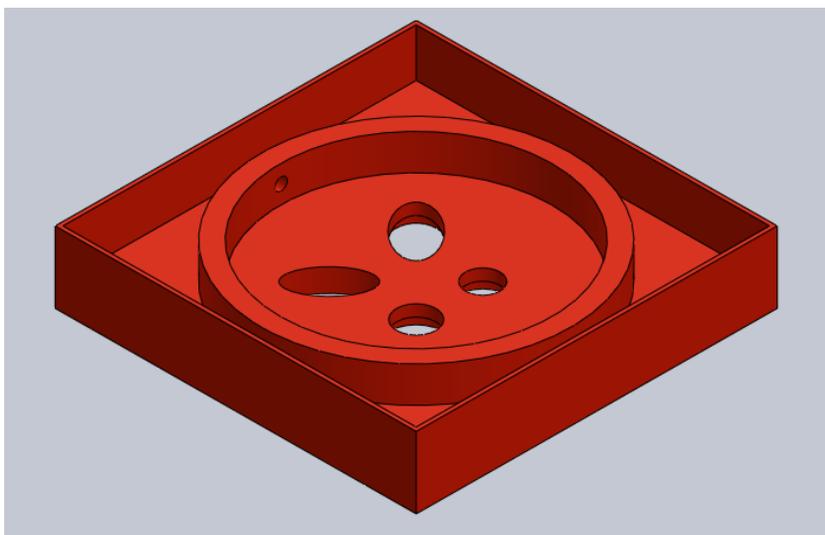


Figura 14.0 Diseño de tapa en SolidWorks



Figura 15.0 Diseño de la tapa

### 3.1.3 Descripción del Circuito de Control de Luminosidad

Consistió en montar una serie de tiras de LEDS necesaria para los procesos fotosintéticos que se dan en su interior de fotobiorreactores.

En el control de luminosidad se efectúa a través de un regulador de voltaje con un potenciómetro incorporado que nos permite obtener un voltaje regulado a partir de una fuente teniendo un voltaje mayor.

Especificaciones del regulador de voltaje

- Convertidor DC-DC Buck: LM2596
- Voltaje de entrada: 4.5V a 40V DC
- Voltaje de salida: 1.23V a 37V DC
- V. salida ajustable (el voltaje de entrada debe tener al menos 1.5V más que la salida).
- Corriente de Salida: máx. 3A, 2.5A recomendado (usar disipador para corrientes mayores a 2A).
- Potencia de salida: 25W
- Eficiencia de conversión: 92%
- Regulación de carga:  $S(I) \leq 0.5\%$ .
- Regulación de voltaje:  $S(u) \leq 0.5\%$ .
- Frecuencia de Trabajo: 150KHz
- Ripple en la salida: 30mV (máx.) 20M bandwidth
- Protección de sobre-temperatura: SI (apaga la salida)
- Protección de corto circuito: SI (hasta 5A)
- Protección limitadora de corriente: SI
- Protección frente a inversión de polaridad: NO
- Dimensiones: 43mm\*21mm\*13mm

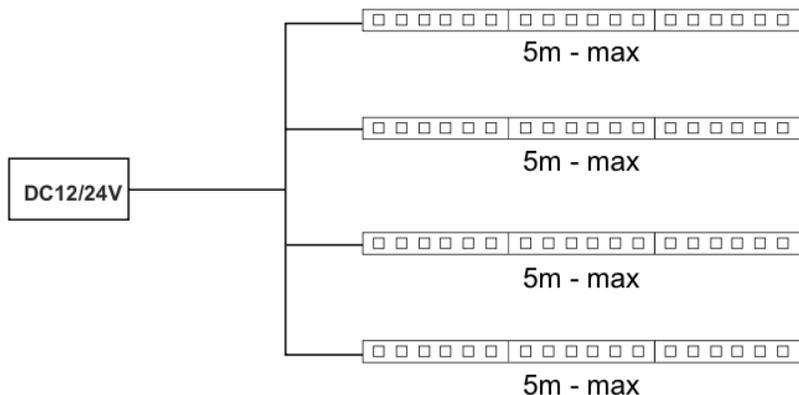
### Fuente de Alimentación

Para la fuente de alimentación de los leds funcionan con 12V CC o 24 V CC por lo que para su alimentación desde la red eléctrica será necesario el uso de una fuente de alimentación adecuada.

### 3.1.4 Instalación de las tiras de leds

En este proceso las tiras LED deben ser cortadas siempre por las líneas de división marcadas en la tira, simplemente se procedió soldándoles cables de conexión al extremo dividido

Todos los cables en la instalación tuvieron la misma longitud.



**Figura 16.0 Conexión de tiras de Leds en paralelo**



**Figura 17.0 Instalación de LEDS al Fotobiorreactor**

Se requirieron varias tiras de LEDS para lograr la luminosidad necesaria en el crecimiento de las microalgas. Se utilizó el Sensor de Luz y Color para medición de la luz en el espectro electromagnético visible a ultravioleta.

## Sistema de Iluminación

Para este sistema de luminosidad optamos por usar tiras de LED, lo cual se analizó la incidencia de la intensidad de luz sobre el crecimiento de las microalgas. Se irradió con diferente intensidad de luz los cultivos con un sistema de luz artificial tipo LED de 0 a 3 000 Lux.

Cuando la biomasa algal se irradia con mayor intensidad lumínica se produce un mayor crecimiento que se comprueba con la mayor intensidad de color (verde más intenso) del cultivo.

También fue posible incorporar un regulador para controlar la intensidad de luz para el cultivo requerido.

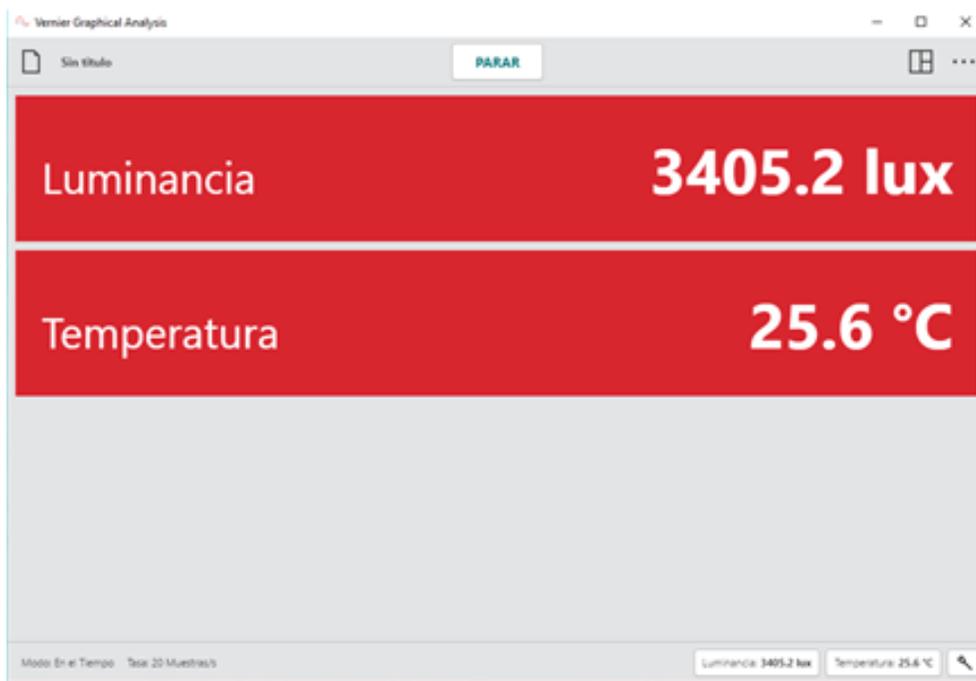
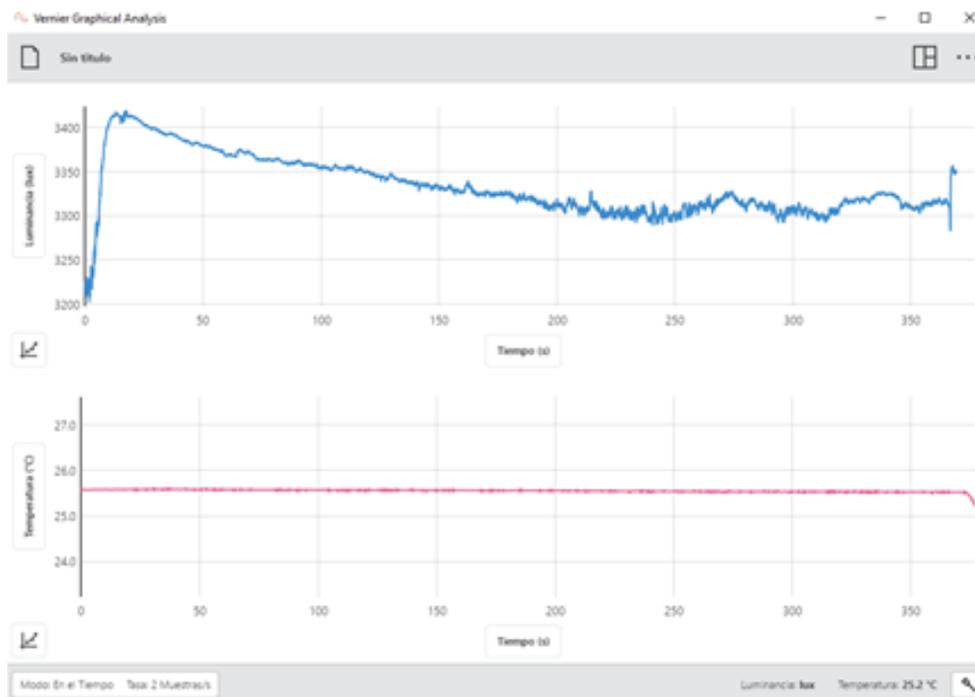


Figura 18.0 (a) Pruebas del Sistema de Iluminación



**Figura 19.0 (b) Pruebas del Sistema de Iluminación**

### 3.1.5 Pruebas de funcionamiento del Sistema de adquisición de datos

Para el Sistema de adquisición de datos optamos del software Graphical Analysis para resultados exactos lo cual nos permite la comunicación con los sensores Vernier este sistema para la adquisición de datos de los parámetros de cultivo de la microalga se operaron los siguientes sensores: (Sensor de Temperatura Sensor de CO<sub>2</sub> (Sensor de Dióxido de Carbono), Sensor de gas O<sub>2</sub> (Sensor de Oxígeno), Sensor de Luz y Color, Sensor de PH y Sensor Optical DO Probe) para visualizar los datos en gráficas y tablas en tiempo real

#### Resultados obtenidos

Las pruebas realizadas durante esta etapa se basaron en la investigación sobre el cultivo de microalga. Se realizaron mediciones con los sensores de temperatura, CO<sub>2</sub>, Oxígeno disuelto, PH, luz/color para la comunicación de datos con la interfaz de Vernier.

Estas mediciones obtenidas de 1 día de monitoreo con los sensores mencionados.

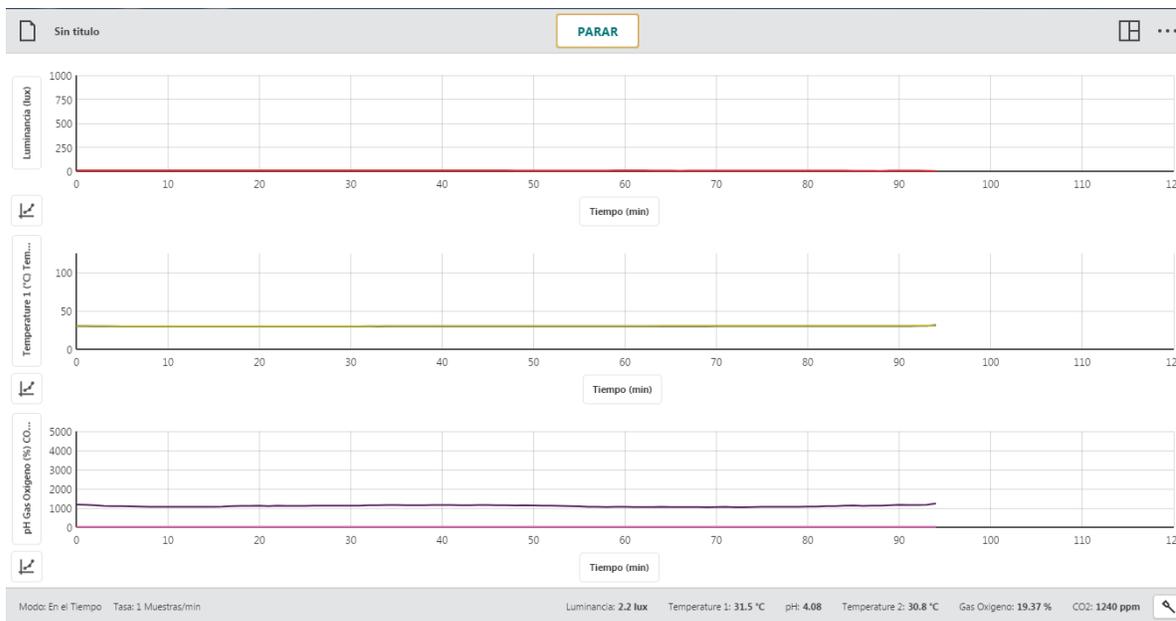


Figura 20.0 Gráfica de los sensores digitales

### 3.1.6 Programación del Control de agitación

Se realizó un Sistema de control de agitación que genera un papel importante en los ciclos de luz/oscuridad.

```

sketch_aug03a | Arduino 1.0.5-r2
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda

sketch_aug03a $
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>

#define DETECT 2 //En el pin 2 se coloca el cruce por ZERO
#define GATE1 9 //Salida del arduino para la resistencia
#define GATE2 11 //Salida para el motor
#define PULSE 4 //trigger pulse width (counts) ancho del pulso
int i=483; //Apagado
int j=65; //Prendido

void setup(){

// set up pins
pinMode(DETECT, INPUT); //zero cross detect
digitalWrite(DETECT, HIGH);
pinMode(GATE1, OUTPUT);
pinMode(GATE2, OUTPUT);
//Se habilitan los pines de salidas y el de entrada

// Set up Timer1
OCR1A = 100; //Inicializa el comparador
TIMSK1 = 0x03; //Se habilita el comparador A para una interrupción
TCCR1A = 0x00; //
TCCR1B = 0x00; //

```

```

sketch_aug03a | Arduino 1.0.5-r2
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda

sketch_aug03a $
TCCR1B = 0x00; //

//Set up Timer 3
OCR3A = 100; //
TIMSK3 = 0x03; //
TCCR3A = 0x00; //
TCCR3B = 0x00; //

// Set Up interrupción cruce por Zero
attachInterrupt(0,zeroCrossingInterrupt, RISING);

}

//Rutinas de la interrupción

void zeroCrossingInterrupt(){ //Detección del cruce por cero
TCCR1B=0x04; //Inicia los dos timer
TCNT1 = 0; //

TCCR3B=0x04; //
TCNT3 = 0; //
}

```

```
sketch_aug03a | Arduino 1.0.5-r2
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda
sketch_aug03a $

ISR(TIMER1_COMP_vect){ //Comparador
  digitalWrite(GATE1,HIGH); //Coloca el Triac en alto
  TCNT1 = 65536-PULSE; //trigger ancho de pulso
}

ISR(TIMER1_OVF_vect){ //timer1 overflow
  digitalWrite(GATE1,LOW); //turn off TRIAC gate
  TCCR1B = 0x00; //disable timer stopd unintended trigger
}

ISR(TIMER3_COMP_vect){ //
  digitalWrite(GATE2,HIGH); //
  TCNT3 = 65536-PULSE; //
}

ISR(TIMER3_OVF_vect){ //timer3 overflow
  digitalWrite(GATE2,LOW); //
  TCCR3B = 0x00; //
}

void loop(){ //
<
40 Arduino Uno on COM5
```

```
sketch_aug03a | Arduino 1.0.5-r2
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda
sketch_aug03a $

}

ISR(TIMER3_COMP_vect){ //
  digitalWrite(GATE2,HIGH); //
  TCNT3 = 65536-PULSE; //
}

ISR(TIMER3_OVF_vect){ //timer3 overflow
  digitalWrite(GATE2,LOW); //
  TCCR3B = 0x00; //
}

void loop(){ //

i--;
j++;
OCR1A = i;

OCR3A = j;//set the compare register brightness desired.

if (i<65){i=483;}
if (j>483){j=65;}
delay(15);
<
78 Arduino Uno on COM5
```

#### 4.- Conclusión

Para este sistema se implementó la interfaz gráfica que permita controlar el fotobiorreactor BIO3L para producir biocombustible. con los sensores incorporados tomar datos necesarios para analizar que además influyen en el crecimiento microalgas. Para el cultivo de microalgas requiere de un sistema de monitoreo para brindar todas las garantías y niveles óptimos durante el proceso

Cabe destacar que el cultivo al aire libre está sometido a las condiciones ambientales y el cultivo en fotobiorreactor presenta la posibilidad de controlar todas las condiciones. Con este proyecto se logra un enfoque importante en los cultivos de microalgas para la obtención de biocombustibles, un tema relativamente nuevo, que hoy en día sigue en desarrollo y buscando una viabilidad que lo lleve a competir, y por qué no, a sustituir los combustibles derivados del petróleo.

## 5.- Referencias

[1] <http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>

[2] Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2), 157-173.

[3] Montes, S., María, A., González Arechavala, Y., & Martín Sastre, C. (2014). Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas.

[4] Benavente-Valdés, J. R., Montañez, J. C., Aguilar, C. N., Méndez-Zavala, A., & Valdivia, B. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. *Revista científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 7(4), 1-12.

[5] Moix, M. A., Álvarez, P., Mateucci, R., Bustos, V., & Della Rocca, P. (2014). Factores que influyen en el crecimiento de la biomasa algal. *Proyecciones*, 69.

[4] Fernández-Linares, L. C., Montiel-Montoya, J., Millán-Oropeza, A., & Badillo-Corona, J. A. (2012). Producción de biocombustibles a partir de microalgas. *Ra Ximhai*, 8(3b), 101-115.