

**SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO NACIONAL DE TUXTLA GUTIÉRREZ**

**REPORTE DERESIDENCIA PROFESIONAL.**

**CONTROL AUTOMÁTICO PARA UN BIORREACTOR DE MICROALGAS.**

**CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA.**

**NOMBRE DEL ALUMNO:**

**LÓPEZ HERNÁNDEZ JONHHY.**

**NO. DE CONTROL: 13270932**

**CORREO: ING.ELECTRIC\_JONHHY@HOTMAIL.COM**

**ASESOR INTERNO: DR. RAFAEL MOTA GRAJALES.**

**TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS. DICIEMBRE DEL 2017.**

# Índice

1. Introducción	
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Estado del arte .....	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivo.....	5
1.5 Metodología.....	5
2 Fundamento teórico	
2.1 Diseño del biorreactor .....	7
2.2 Factores que intervienen en el cultivo de la microalga.....	9
2.3 Sensores.....	11
2.4 Sistema de control. ....	18
3 Desarrollo	
3.1 Descripción del sistema realizado.....	20
3.2 Diseño de la interfaz hombre-maquina.....	<u>22</u>
3.3 Configuración de las variables de medición.....	26
4 Conclusiones.....	27
5 Referencias bibliográficas.....	28
6 Anexos	
Anexo A: Diseño del biorreactor .....	29

# Control Automático para un Biorreactor de Microalgas.

## 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes

Las microalgas constituyen un grupo de microorganismos cuyos usos potenciales aún se siguen estudiando a profundidad, pero hasta ahora ha demostrado ser un elemento versátil como fuente alternativa de alimentos y sustancias bioactivas ya que se puede aprovechar en nutrientes como el omega3 que en el ser humano tiene efectos benéficos; o también se puede aprovechar para la generación de lípidos a partir de los cuales se crean biocombustibles.

Las microalgas son sensibles a las concentraciones de gases disueltos en el medio. Por lo tanto, altas concentraciones de CO<sub>2</sub> pueden acidificar notablemente al medio, provocando una inhibición del crecimiento por CO<sub>2</sub>. Por lo contrario concentraciones muy altas de O<sub>2</sub> pueden provocar una inhibición por O<sub>2</sub>. Estas situaciones de inhibición hacen del nivel de burbujeo una variable pertinente para la incorporación o despojo de aquellos compuestos en su medio.

Un biorreactor es un sistema capaz de promover la fotosíntesis para facilitar el crecimiento de microalgas. Para que el cultivo de microalgas sea eficiente es necesario diseñar biorreactores que transmitan la mayor cantidad posible de luz, esto implica alta relación superficie/volumen del reactor. De esta forma, la eficiencia de un biorreactor es determinada en base a la captación y distribución del uso de la luz.

Los biorreactores de sistemas abierto son en la actualidad los más extensos y económicamente baratos, pero sin embargo en estos sistemas no es posible un efectivo control de las condiciones de cultivo, estando sumamente expuestos a las condiciones ambientales y con elevados riesgos de contaminación. Todo esto ha hecho que este sistema de cultivo se vea limitado a un reducido número de especies extremófilas.

Los biorreactores de sistemas cerrado no están expuestos al medio ambiente lo que vienen a constituir un sistema de cultivo altamente intensificados, siendo diversos los diseños y los rendimientos que se pueden alcanzar. Estos modelos permiten el control absoluto sobre variables de cultivo tan decisivas como la luz, la temperatura u otras variables que llegan a aumentar la eficiencia en el cultivo.

El cultivo de microalgas es una actividad que aún no está del todo establecida, con unos niveles de producción relativamente limitados, al concurrir una serie de factores como una baja eficiencia fotosintética en condiciones de alta irradiación luminosa, así como en baja irradiación, lo que repercute en tasas de crecimiento y en la dificultad de optimizar el cultivo a gran escala.

Encontramos diferentes factores que si no son tomados en cuenta o mejor dicho si no se manejan adecuadamente podría llevar a nuestro cultivo a la inhibición y por lo tanto no se tendrían los resultados deseados, un ejemplo de dichos factores que afectan al sistema es la

mala instrumentación con nuestros equipos o variables a controlar, así como el diseño del biorreactor.

## **1.1 Estado del Arte**

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) México-2014, ha desarrollado una formulación para la eficiencia en el crecimiento de microalgas. Que consiste en el mantenimiento y monitoreo de las microalgas. Se diseña y selecciona los materiales para la construcción del biorreactor, así mismo implementando el sistema automatizado donde se incluye la fase de potencia, para el monitoreo de los parámetros del cultivo [1].

Edilberto López Pérez de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca-2013, Diseñó e implementó un sistema de instrumentación de variables que influyen en los procesos del crecimiento de microalgas. Siguió un proceso de electrónica que combina el hardware con software, utilizando una PC para ejecutar un programa que inter-comunica la PC con los dispositivos electrónicos con el fin de censar las variables y controlar el proceso [2].

J. R. Benavente, J. C. Montañez, C. N. Aguilar, del departamento de Investigación en Alimentos y Facultad de Ciencias Químicas. Coahuila-2012. Están revisando los diferentes factores de cultivo que influyen en el crecimiento de las microalgas instalando a su equipo el control de luz, temperatura, pH, nutrimentos, transferencia gaseosa, turbulencia y mezclado, así como también los principales aspectos para el diseño de biorreactores [3].

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) Madrid España-2012. Ha diseñado un sistema modular para el cultivo continuo de microalgas, que consta de biorreactores cerrados. El sistema incluye bombas para alimentar las microalgas con CO<sub>2</sub> y nutrientes, sistemas de filtrado y esterilización para que el cultivo sea axénico (puro y proveniente de una sola célula) y un sistema para la recolección de las microalgas [4].

La Universidad de Piura. Perú-2015 desarrolló un sistema de monitoreo partiendo del tema de nuevas energías renovables a través del proyecto 025-FINCYT-PITEA-2008. Donde se realizó la medición en tiempo real de los parámetros de trabajo del cultivo a través del uso de sensores interconectados con el sistema OPTO 22, mediante un control vía inalámbrico desde una aplicación de celular, de tal forma se adquirió el registro de la data para un análisis completo de la influencia de parámetros sobre el crecimiento de la microalga [5].

Lo que se propone como proyecto es desarrollar un biorreactor de sistema cerrado con la instrumentación efectiva para el cultivo de microalgas, donde se tomará en cuenta el tamaño de la burbuja al momento de la aeración, la temperatura, el PH, la intensidad luminosa dentro y fuera del biorreactor, así como también el control de los niveles de inyección de CO<sub>2</sub> y de oxígeno disuelto, quitando así el riesgo de contaminación del medio ambiente.

## **1.2 Justificación**

La automatización del biorreactor constituye un avance significativo en lo relativo a la producción de microalgas cuando esta es una de las primeras en trabajar en el Instituto. Al realizar la instrumentación para el control del crecimiento de microalgas sería beneficiado al

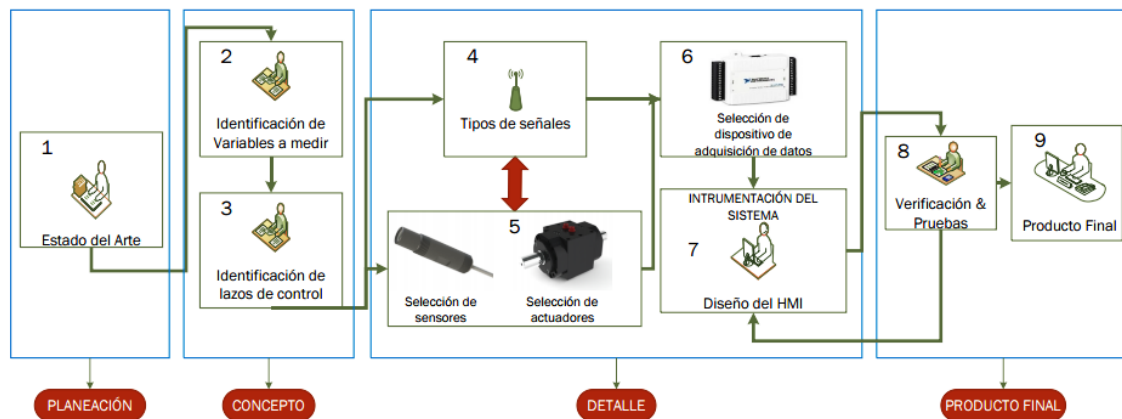
tener herramientas basadas en datos medibles para la toma de decisiones y optimización posterior del proceso.

La realización de este trabajo constituye, una base para futuras investigaciones relacionadas con el estudio del crecimiento de la microalga y sentará las bases para el crecimiento en mayor volumen, lo que derivará en la producción de biocombustibles y productos alimenticios que actúa como una fuente de energía, siendo un referente de innovación tecnológica en la región.

### 1.4 Objetivos

Diseñar y construir un biorreactor de sistema cerrado, automatizar el sistema de medición y monitoreo del pH y temperatura, así mismo controlar las variables de iluminación y del flujo de la aeración para dicho biorreactor.

### 1.3 Metodología



*Figura 1.1 Diagrama a bloques del proceso.*

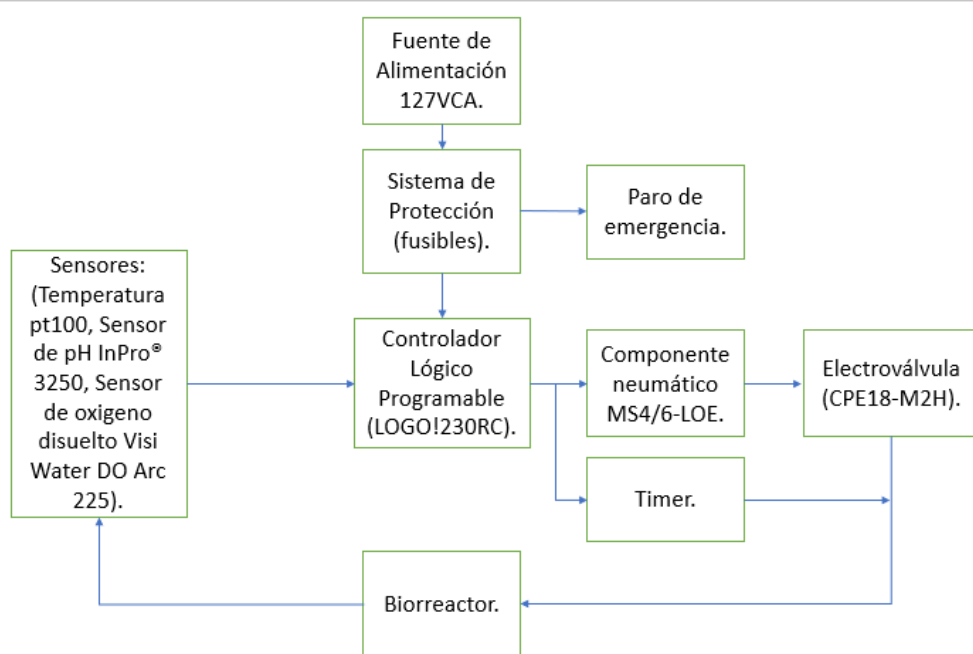
- |   |   |
|---|---|
| 2 Revisión de Bibliografía existente.                                   | 7 Selección de DAQ para realizar interfaz con equipo. |
| 3 Selección de variables que inciden en el crecimiento de la microalga. | 8 Modelado de interfaz mediante software              |
| 4 Identificación de la interacción entre dispositivos.                  | 9 Puesta a prueba en caso de estudio y afinamiento.   |
| 5 Identificación y elección de señales de los dispositivos.             | 10 Instrumentación del biorreactor                    |
| 6 Selección de sensores y actuadores del proceso.                       |   |

La metodología a utilizar en el proyecto se compone de una serie de 4 etapas: Planeación, Concepto, Detalle y Producto Final. Durante la primera y segunda etapa se siguió el método de investigación descriptiva, y de esta manera se buscó especificar propiedades, características, riesgos importantes de cualquier fenómeno analizado.

La tercera parte se enfocó en la selección de instrumentos que son base para la propuesta de instrumentación tomando en cuenta las propiedades particulares de cada uno de los sensores, actuadores, y controladores. Se buscó la interacción armónica entre cada uno de estos elementos y de esta manera se realizó la interfaz HMI

Como parte de este proyecto se han seleccionado ya algunas de las variables de medición, esto debido a la importancia y prioridad que presentan, siendo parte importante de este trabajo el mencionarlos: pH y temperatura. Las demás variables de medición fueron seleccionadas siguiendo lo ya establecido, con base en la prioridad de los factores que afectan a la producción de microalgas, la flexibilidad del instrumento, el coste y el tiempo de adquisición de dichos elementos

Para la cuarta parte, o producto final se realizó un caso de estudio para verificar su correcto funcionamiento. A partir de este punto se pudo continuar con las correcciones al punto de la interfaz HMI. Finalmente, los resultados se orientarán a un proceso de instrumentación y control de un biorreactor del cual se buscó un impacto en los tiempos de montaje, medición, flexibilidad y una reducción general de costos totales.



*Figura 1.2 Diagrama a bloques del hardware.*

La producción de microalgas dentro de un biorreactor cerrado sigue un proceso dentro de un sistema de lazo cerrado. En un sistema de lazo cerrado, o sistema de retroalimentación se alimenta la señal de error de accionamiento, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación al controlador para reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado

En este diagrama nos presenta la entrada de alimentación que manejaremos con un voltaje de 127 volts que pasará por las protecciones adecuadas para que no llegue a dañar nuestro

controlador en caso de alguna falla. Utilizaremos un sistema eléctrico neumático que nos permitirá controlar algunas de las variables que queremos manipular para que después mediante los sensores haga la toma de datos y estos lleguen a nuestro PLC que dependiendo de las circunstancias que se presenten pueda manipular a nuestros actuadores.

## 2. Fundamento teórico

### 2.1 Diseño del biorreactor

Un biorreactor es un dispositivo biotecnológico que debe proveer internamente un ambiente controlado que garantice y maximice la producción y el crecimiento de un cultivo; esa es la parte biológica. Externamente el biorreactor es la frontera que protege ese cultivo del ambiente externo: contaminado y no controlado. El biorreactor debe por tanto suministrar los controles necesarios para que la operación o proceso se lleve a cabo con economía, alto rendimiento (productividad) y en el menor tiempo posible; esa es la parte tecnológica.

El desempeño de los biorreactores depende casi en su totalidad del microorganismo que se selecciona para obtener el producto de interés. Aunque la productividad del proceso está relacionada con la optimización de los parámetros de operación del equipo, siendo la célula la entidad donde se desarrolla toda actividad manufacturada. Debido a que la producción depende de la población de microorganismos el ambiente donde las células se cultivan debe proporcionar lo necesario para que ellas rindan los resultados esperados.

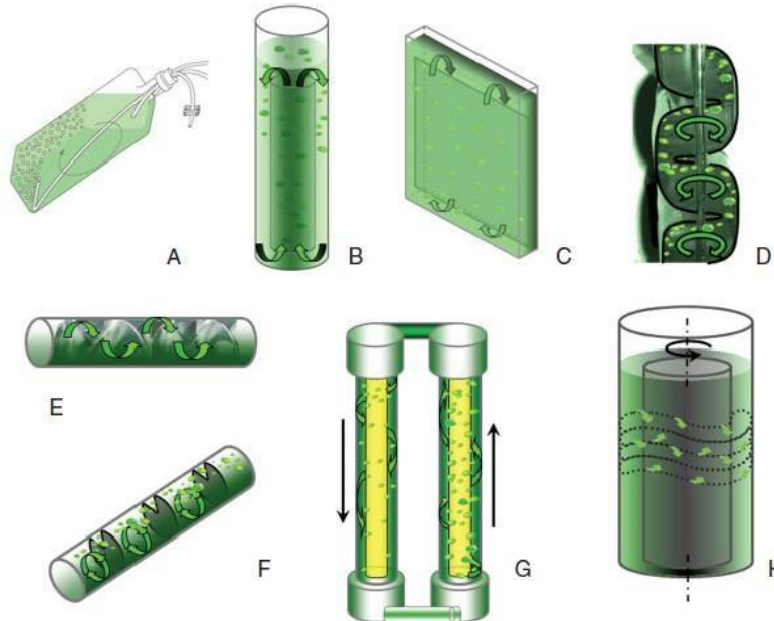
Un biorreactor está diseñado para brindar las características necesarias de monitoreo de diferentes variables como temperatura, presión y concentración de gases, originadas como resultado de la transformación química, las mismas que deben mantenerse controladas a fin de ofrecer condiciones óptimas para el desarrollo y la acción del microorganismo

En el diseño del biorreactor se tiene en cuenta, además del tipo de proceso microbiológico, el efecto del flujo, el tiempo de residencia, el pH, la temperatura, la biomasa, la concentración de nutrientes y la velocidad de agitación para que se desarrolle en forma óptima la conversión de los lodos. El diseño de reactores químicos es un área en la que convergen varias ramas de la ingeniería y del conocimiento como lo muestra la Figura 2.1.



**Figura 2.1** El diseño de reactores químicos, un reto multidisciplinario.

Los biorreactores un recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo. En algunos casos, un biorreactor un recipiente en el que se lleva a cabo un proceso químico que involucra organismos o sustancias bioquímicamente activas derivadas de dichos organismos. La palabra que los denomina esta´ compuesta por el prefijo griegos: bio (vida); Actualmente se conocen múltiples modelos de biorreactores.



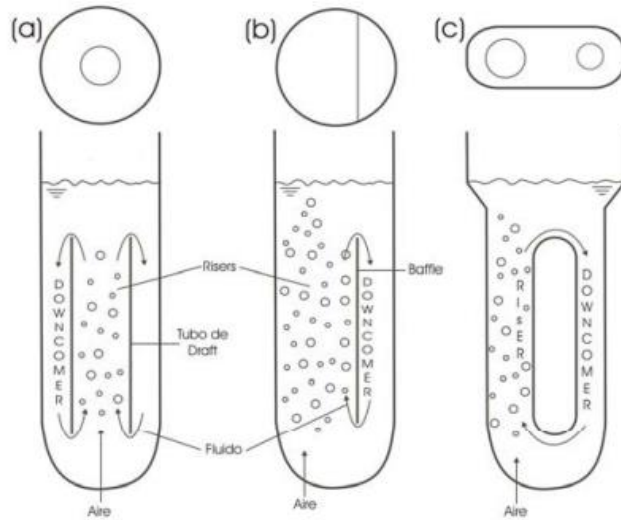
**Figura 2.2** A) Columna de burbujeo plana e inclinada B) Airlift de circulación interna C) Airlift plano D)Airlift de panel plano Subitec E) biorreactor tubular con mezclador estatico Kunll F) biorreactor tubular con baffles como mezclador estatico G) Airlift de circulación en espiral H) biorreactor de Couette Taylor.

Columnas verticales (columna de burbujeo y airlift). Los biorreactores airlift poseen una recirculación y son conocidos también, como biorreactores de elevación con aire o en rizo. Consiste en un tanque dividido en dos zonas interconectadas, principalmente por un baffle o un tubo de draft. Sólo una región es asperjada con gas y es conocida como ascenderte o riser, la otra zona se nombra descendente o downcomer.

La división en dos zonas conduce a una diferencia de densidades en el flujo entre ambas regiones, tendiendo a ser menor en el caso del riser, con lo que se origina la recirculación del medio en el reactor. La separación en dos zonas hace que sean más efectivos en la suspensión de células y en la transferencia de oxígeno que las columnas de burbujeo. Estos biorreactores están formados por un tubo vertical transparente.

El aspersor se encuentra en la parte inferior de la columna y provee al reactor de pequeñas burbujas que tienen por función el mezclado del líquido y la transferencia de masa de CO<sub>2</sub> y la remoción de O<sub>2</sub>. Las columnas de burbujeo son reactores de contenedor cilíndrico cuya altura es más del doble de su diámetro. Sus principales ventajas son: bajo costo, área superficial mayor en relación al volumen, mezclado relativamente homogéneo, eficiente liberación de O<sub>2</sub>.





**Figura 2.3** Diferentes configuraciones de reactor air-lift

A mayor altura de la columna se necesitan de platos perforados que permitan la formación de burbujas de la mezcla de gas. En las columnas de burbujeo es recomendable no usar flujos de aire mayores a 60 m/s. Como sistema de iluminación se recomienda el uso de LED's. Los biorreactores airlift se pueden encontrar en configuraciones de circulación interna y de circulación externa como se ilustra en la figura 2.3.

La principal ventaja es que con esta configuración se crea un patrón de circulación de mezclado donde el medio líquido pasa continuamente de las zonas oscuras a las zonas iluminadas creando un efecto de intermitencia de luz. Este efecto se produce cuando la fase líquida se eleva en la zona donde el gas es inyectado y desciende en la otra zona, las células son transportadas en el flujo líquido-gas y experimentan una irradiación regular y periódica es solo si las 2 secciones tienen diferentes niveles de irradiación.

El principal inconveniente de la irradiación periódica experimentada por las microalgas en un biorreactor airlift es el tiempo de circulación entre las dos zonas. El tiempo de circulación depende del cuadrado de la raíz de la altura del biorreactor y se encuentra en el orden de segundos. El sistema airlift actuaba como sistema de desgasificación. Sus ventajas incluyen un mejor control de las variables de cultivo, mayores productividades y reducción de la energía de consumo.

## 2.2 Factores que intervienen en el cultivo de la microalga.

Numerosos factores influyen en el crecimiento de la microalga incluyendo luz, suministro de nutrientes, CO<sub>2</sub>, pH, temperatura y O<sub>2</sub>. La tasa de crecimiento de lípidos contenidos en la microalga tiene una relación muy estrecha con la luz, nitrógeno, fósforo y la temperatura. Las condiciones óptimas de crecimiento de la microalga deben ser aquellas que incrementen la tasa de crecimiento y el contenido de lípidos, los cuales son los factores principales que afectan la producción de biocombustibles.

La luz. La intensidad, longitud de onda y la frecuencia de la luz afectan la eficiencia de fotosíntesis de la microalga. El valor decisivo que afecta el crecimiento de la microalga es la intensidad de luz dentro del cultivo, no la intensidad que impacta en la superficie del cultivo, porque este último es opacado antes de llegar a la célula de la microalga por la vía de absorción y la sombra de otras células. Las microalgas y las plantas tienen dos tipos de fotosíntesis: Fotosíntesis I, en que el punto de absorción alcanza los 680 nm; Fotosíntesis II, en donde el pico se sitúa en los 700 nm.

La luz natural es usada preferentemente por el hecho de que es gratis. La conversión natural de luz por las microalgas alcanza el rango del 3%-11%, la cual se vuelve más alta bajo condiciones artificiales. Una de las dificultades presentadas por este tipo de luz es su control, este puede ser muy alto en días soleados, y muy bajo en días nublados.

Los nutrientes. Muchos nutrientes deben ser suministrados al cultivo, como carbono, Oxígeno, Hidrógeno, Nitrógeno, Potasio, Fósforo, Calcio, Magnesio, Hierro, Sulfuro. Los nutrientes que más se deben suministrar a las microalgas son los primeros 6 que se mencionaron. Los primeros 3 se obtienen del aire y el agua, y los últimos 3 deben ser absorbidos del medio en el que se encuentra el cultivo. El Nitrógeno y fósforo juegan un rol al controlar la tasa de crecimiento y la producción de lípidos por parte de la microalga.

El CO<sub>2</sub>. Es necesario el suministro continuo de CO<sub>2</sub> a las microalgas. Los niveles de CO<sub>2</sub> en sistemas abiertos son difíciles de controlar debido a que estos se dispersan a la atmósfera, utilizar gases producto de la combustión o por inyección nos permite alcanzar las necesidades de las microalgas. La máxima eficiencia de fotosíntesis es a menudo lograda con concentraciones de CO<sub>2</sub> que van del 1% al 5% (por volumen).

Es muy significativo utilizar estos gases, subproducto de un proceso industrial, lo que reduciría la emisión de gases de efecto invernadero, así como los costos en la economía de los biocombustibles. El control del CO<sub>2</sub> es a menudo un subproducto del control del pH donde el flujo en el biorreactor se mide usando un medidor de flujo másico y es dosificado por el control del pH.

El pH. El pH es otro factor principal, éste debe ser controlado para mejorar el aprovechamiento de CO<sub>2</sub> por la microalga, la cual es consumida en la fase de fotosíntesis, el rango aceptable de pH para muchas de las especies de microalgas es de 7 a 9. Este es medido usando electrodos de vidrio o sondas ópticas de pH.

La temperatura. Dicha temperatura puede variar de acuerdo a la especie de microalga. En cultivos de agua dulce, por ejemplo, la microalga *Chlorella* es capaz de adaptarse a temperaturas con un rango de los 5-35 ° C con una temperatura óptima de 25-30 ° C. La temperatura es usualmente medida con un sensor industrial estándar pt-100.

El O<sub>2</sub> es un producto de la fotosíntesis, debe cuidarse que no exista una gran cantidad de O<sub>2</sub> disuelto en el cultivo ya que puede inhibir la tasa de crecimiento de la microalga, amenazando el cultivo. La concentración de oxígeno disuelto se reconoce como un indicador fiable y sensible del estado de cultivo de microalgas en relación con el crecimiento y la productividad.

El oxígeno se elimina rociando el cultivo con aire enriquecido con CO<sub>2</sub>, combinando así la eliminación de O<sub>2</sub>, el suministro de CO<sub>2</sub> y el control del pH en un solo paso.

### 2.3 Sensores

Los procesos en los que se apoyan la ciencia y tecnología generan variables físicas, las cuales se pueden medir mediante instrumentos que tienen como misión determinar la magnitud de una variable, visualizarla, generarla o convertirla en otra diferente. El proceso de medición requiere el uso de instrumentos como medios físicos para determinar la magnitud de una variable.

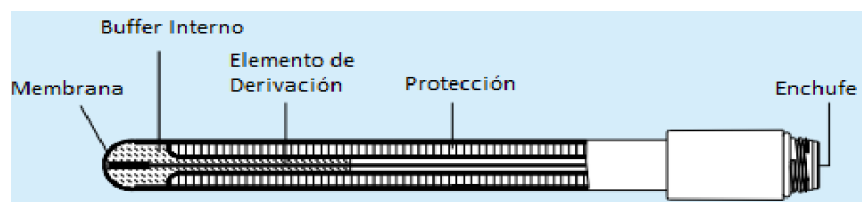
Los instrumentos constituyen una extensión de las facultades humanas y en muchos casos permiten a las personas determinar el valor de una cantidad desconocida, la cual no podría medirse utilizando solamente las facultades sensoriales, por lo tanto, un instrumento se puede definir como un dispositivo para determinar el valor o la magnitud de una cantidad o variable. Por lo cual se refiere a un grupo de sistemas permanentes que nos ayudan a medir objetos y mantener el control retroactivo de un proceso.

Sensores: En general, la mayoría de los sensores consta de cuatro componentes principales: (1) un área de muestreo donde se produce la química de la superficie, (2) el transductor, (3) la electrónica de procesamiento de la señal y (4) una unidad de visualización de la señal.

Sensor de pH: El pH es una medida de la acidez de un fluido, medida en diversos tipos de industrias. Por ejemplo, en la industria química, la acidez de los reactivos en muchos tipos de reactores debe ser controlada para permitir condiciones óptimas de reacción. Además, en la industria del agua, la acidez del agua para el consumo y del efluente para la descarga tiene que ser controlada cuidadosamente para satisfacer los requisitos legales.

El pH es una medida electroquímica, invariablemente realizada por medio del electrodo de vidrio. Es una medición notoriamente difícil de realizar debido a factores tales como la deriva y el ensuciamiento. Es importante tener en cuenta en este punto la conocida escala de pH de 0-14, simétrica alrededor de pH 7, de la cual 0-7 corresponde a soluciones ácidas y 7-14 a soluciones alcalinas.

La composición del sensor de pH (Figura 2.4), consta de un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia. Los dos electrodos se combinan a menudo en una sola unidad. El electrodo consiste en un eje de vidrio con una fina membrana de vidrio al final, sensible a los iones positivos de hidrógeno. El exterior de esta membrana forma una capa de gel cuando la misma entra en contacto con la solución acuosa. Una capa similar se forma dentro de la membrana de vidrio, ya que el electrodo está lleno con una solución electrolítica acuosa interna.



*Figura 2.4 Electrodo de pH con membrana sensitiva*

Los iones de Hidrógeno pueden difundirse dentro o fuera de la capa de gel dependiendo del valor del pH y por lo tanto la concentración de iones positivos de hidrogeno medidos en la solución. Si la solución es alcalina los iones positivos de hidrogeno se difunden fuera de la capa y se establece una carga negativa en el lado exterior de la membrana. Si la solución es ácida sucede lo contrario, los iones se difunden en la capa y se acumula una carga positiva en el lado externo de la membrana.

Una fem pequeña se genera directamente proporcional al pH que se está midiendo. El objetivo del electrodo de referencia es completar el circuito y generar una fem conocida contra la que se puede medir la generada por el electrodo de vidrio. La diferencia entre las dos emisiones se mide mediante un dispositivo de alta impedancia, de modo que hay una corriente despreciable extraída del Circuito: esto mantiene la resistencia de las soluciones dentro de los electrodos.

Para realizar una medición concreta con este elemento, se requiere de un electrodo de pH y al menos 2 buffer (soluciones reguladoras que mantendrán el pH del electrodo estable), uno de pH 7 y otro con un pH de 4 o 10. Asimismo, hacer una calibración de 3 puntos ofrece un mejor resultado, en el caso de hacerlo con 2 puntos el segundo punto deberá tener el valor más cercano al valor de la muestra.

Naturaleza de un sensor de pH. Los electrodos del pH tienen una reputación de ser temperamentales, el medio más común de abordar este problema es mediante la compensación de la temperatura. Así, junto a los electrodos de vidrio y de referencia se instala una sonda de temperatura, conectada al transmisor de pH, que corrige automáticamente el valor del pH. El valor de pH más exacto se obtiene cuando la temperatura de la solución de calibración y la solución medida son idénticas.

Los electrodos de cristal son delicados y pueden ser dañados fácilmente. Son muy sensibles al ensuciamiento, lo que provoca lecturas falsas y por su naturaleza electroquímica requieren una atención constante: llenado de electrolito, re-calibración, etc. Sin embargo, los sensores modernos de pH son muy fiables para soportar autodiagnósticos, re-calibración automática, etcétera.

La formación de una capa impermeable a la superficie del bulbo de vidrio, ya sea debido a la deposición de suciedad o acumulación de residuos, causa deriva, histéresis y respuesta lenta. Para uso en fluidos sucios ninguno de ellos es totalmente satisfactorio. Si no se puede evitar el ensuciamiento, digamos por medio de un filtro, entonces es mejor aceptar que es necesario un reemplazo o limpieza regular de los electrodos.

Instalación de un sensor de pH. Los electrodos se instalan normalmente en soportes especiales diseñados para permitir el contacto con el medio líquido del proceso, al tiempo que proporcionan protección contra daños mecánicos. Los soportes están disponibles para sumergir los electrodos en un tanque, normalmente insertado verticalmente a través del techo o suspendido por encima de la superficie del líquido.

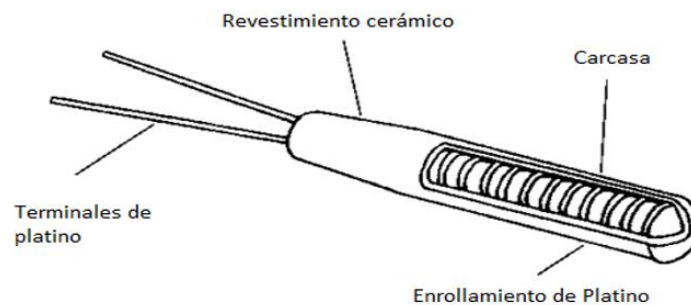
También son muy comunes los soportes de electrodos en línea. Tal vez la mejor disposición, aunque sea costosa, es insertar los electrodos en una corriente de muestra en algún compartimiento separado del analizador donde los electrodos pueden inspeccionarse, limpiarse y calibrarse regularmente.

Sensor de temperatura. La temperatura es una variable que a menudo se mide dentro de los procesos de la industria. Para ello pueden utilizarse diversos dispositivos tales como los termopares o los dispositivos de temperatura de resistencia (RTD por sus siglas en inglés), aunque el rango de costo y precisión varía entre ellos, siendo más baratos los primeros, pero no tan precisos.

Principios del termopar. Un termopar resulta de la unión de 2 metales de distintos en un circuito. Una de las uniones puede calentarse a una temperatura más alta que la otra, lo que genera una pequeña fem e induce una corriente. Debido a que la fem es pequeña, tiene que ser medida en circuito abierto, dado que la medición en el circuito cerrado tendrá efectos de carga y distorsionará la medición.

Es importante para ello usar un transductor de impedancia de entrada muy alto. De esta manera, la fem generada depende de la diferencia de temperatura entre las dos uniones. Para la medición de la temperatura es usual usar la unión caliente como el sensor y medir con respecto a la unión fría. Por lo tanto, debe conocerse la temperatura de la unión fría, conocida como la unión de referencia. Así pues, la referencia en el metal frío en aplicaciones industriales se da frecuentemente tomando la temperatura ambiente.

Detectores de Temperatura Resistivos (RTD). Existen dos tipos de RTD de platino: El tipo de película y la bobina de alambre. El tipo de película se forma por la deposición de platino sobre un sustrato de cerámica. Debido a su tipo de película de estructura plana, los RTD son adecuados para mediciones de temperatura superficial. Sin embargo, no son tan fiables como los RTD de bobina de alambre. El RTD de bobina de alambre, como se representa en la Figura 2.5, se utiliza casi universalmente para la medición precisa de la temperatura.

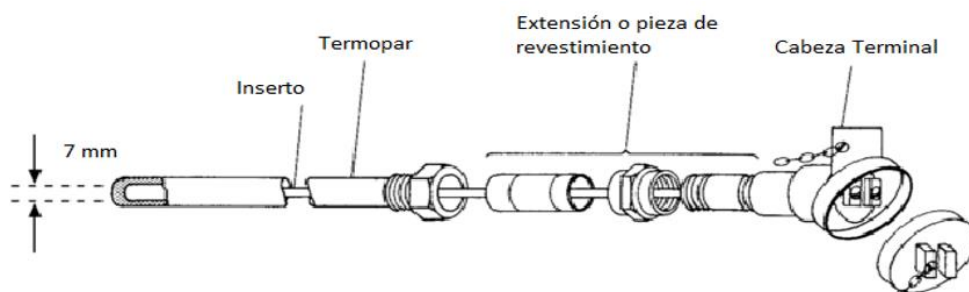


**Figura 2.5** RTD de Bobina de alambre

Como se aprecia en la Figura 2.5, el RTD de bobina de alambre consiste en un alambre de platino enrollado alrededor de un tubo de vidrio sellado también con un revestimiento de vidrio o de cerámica. Con los termopares, es práctica normal el uso de RTDs en envolturas

minerales de acero inoxidable de hasta 6 mm de diámetro. Los conductores de platino están aislados con tubos de sílice, para evitar cortocircuitos, terminando en un bloque de cerámica esmaltada en el extremo externo del tubo.

Thermowell. El dispositivo está conformado por una funda, que contiene el termopar o RTD, y el conjunto del bloque de terminales, como se muestra en la Figura 2.6. Está en contacto directo con el medio de proceso y tiene que ser capaz de resistir cualquier condición de proceso existente en la planta.



*Figura 2.6 Thermowell, ensamble del inserto y capacidad de cabezal.*

La tapa de la cabeza es típicamente una fundición de acero con una tapa de rosca que protege los terminales del polvo y la humedad y proporciona acceso para el mantenimiento. Aunque un termopar o un RTD tienen una respuesta intrínsecamente rápida, la película de aire entre la funda y el thermowell es una resistencia significativa a la transferencia de calor. El efecto es entonces una respuesta lenta.

Si la envoltura y el thermowell se agrupan juntos como un sistema de primer orden, la constante de tiempo es típicamente 0,5-1,0 min, pero en casos extremos puede ser de hasta 5 min. La transferencia de calor también se puede mejorar vertiendo una pequeña cantidad de aceite de transferencia de calor patentado en el anillo entre la funda y el thermowell. El thermowell tiene varias funciones. Permite el contacto térmico entre el proceso y la funda que contiene el termopar o RTD.

Permite que dicha funda sea retirada para mantenimiento sin tener que cerrar la planta. Además, durante el mantenimiento, impide la contaminación del proceso por la entrada de aire o suciedad. De particular importancia es el diámetro interno, normalmente de 7 mm, que es consistente con el diámetro externo máximo de 6 mm de diámetro de las envolturas del termopar y del RTD. La longitud de un thermowell se determina por la aplicación.

Así pues, es importante saber escoger bien el tipo de instrumento que se utilizará para realizar la medición de la temperatura. También es importante designar la posición en que este será colocado, pues debe tratarse de que esté en contacto con el fluido en el que se realizará la medición, ya que la precisión de nuestro sensor dependerá en gran medida de la posición que este ocupe.

Sensores de CO<sub>2</sub>. Como se mencionó anteriormente, es vital para las microalgas el abastecimiento de CO<sub>2</sub>, de esto se deriva que la medición de este gas debe ser supervisado

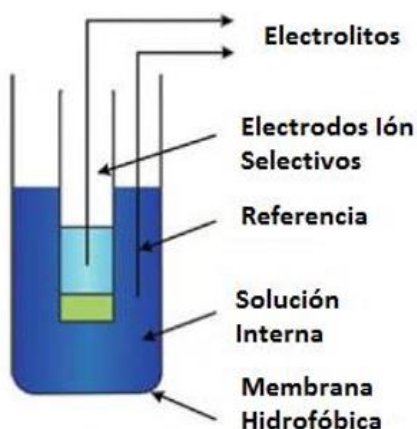
para asegurar un crecimiento óptimo del cultivo. El potencial de mercado para sensores de CO<sub>2</sub> confiables y baratos es enorme debido a una amplia gama de aplicaciones en la industria agroalimentaria.

Actualmente, monitoreo inteligente del CO<sub>2</sub> se está volviendo importante en el número de aplicaciones basadas en agro combustión, tales como el intercambio de gas de las plantas, el monitoreo del gas atmosférico, el flujo de CO<sub>2</sub> en el suelo, el monitoreo de la composición del biogás. Esto debido a las condiciones presentadas en cultivos a campo abierto, lugares donde se debe tener una capacidad de manejar esta variabilidad, mismas que los sensores industriales no presentan al estar en espacios controlados.

Las dos funciones principales en los sistemas sensores de gas son el reconocimiento de la molécula y la transducción de ese evento de reconocimiento en una señal útil. Una serie de técnicas de detección simplificadas han sido propuestas y desarrolladas para la medición rutinaria de las concentraciones de CO<sub>2</sub>. El sistema más común para la detección de CO<sub>2</sub> es el siguiente: Sensores potenciométricos tipo Severinghaus, cromatografía de gases (GC), espectrómetros de masas (MS) y detectores de absorción de infrarrojos.

**Sensor Severinghaus** El sensor de CO<sub>2</sub> de Severinghaus (Figura 2.7) consiste en un electrodo de vidrio llenado con una solución acuosa de bicarbonato y cubierto por una fina membrana de plástico. Esta membrana de plástico es permeable al CO<sub>2</sub>, pero impermeable al agua y los electrolitos. El principio de medición se basa en el hecho de que, en una solución acuosa, el CO<sub>2</sub> forma ácido carbónico, que se disuelve en un anión bicarbonato y un protón.

Este proceso da como resultado el cambio del valor de pH de la solución electrolítica, que se mide mediante una sonda de pH. El principal inconveniente de este tipo de sensor es que el CO<sub>2</sub> no se mide directamente, sino en su forma iónica. Otras desventajas son que otros ácidos volátiles o gases básicos pueden perjudicar la medición del valor del pH y los costes de mantenimiento son muy elevados.



*Figura 2.7 Esquema del electrodo severinghaus general.*

**Cromatografía de Gases y Espectrómetro de masas** El principio de trabajo de la GC es la adsorción selectiva y elución de las moléculas de gas de interés en la columna del

cromatógrafo de gases. En el espectrómetro de masas, el gas de muestra es bombardeado con haz de electrones de alta energía que provoca la fragmentación de las moléculas en la muestra.

Estas moléculas fragmentadas se hacen para moverse a través de un campo magnético debido a su carga y se separan basado en su carga y masa. El espectrómetro de masas es capaz de producir mediciones en tiempo casi real, pero es muy costoso, mientras que GC es de bajo costo, pero requiere mucho más tiempo para completar un análisis. Por lo tanto, GC y MS no se pueden utilizar para mediciones en tiempo real.

**Sensores Ópticos.** Los sensores de CO<sub>2</sub> más comercialmente disponibles son detectores de infrarrojos. Los detectores infrarrojos producen tiempos de respuesta rápidos y son fiables, pero sólo pueden utilizarse para la monitorización de CO<sub>2</sub> gaseoso. Las ventajas de los sensores de gas infrarrojo sobre los instrumentos analíticos tales como GC-MS incluyen costos más baratos, tamaño compacto, control de proceso fácil, producción en masa fácil y medición continua.

El detector infrarrojo no dispersivo (NDIR) es más sencillo en estructura y fácil de usar. En un sensor NDIR típico, la energía infrarroja pasa a través de dos tubos idénticos. Uno de ellos es un tubo de referencia, y está lleno de gas no absorbente tal como nitrógeno. El segundo tubo contiene la muestra de gas a analizar y es una célula de medición. Los filtros se utilizan en el NDIR para obtener un haz monocromático de una fuente de luz infrarroja con un amplio rango de longitudes de onda.

Esta luz se permite pasar a través de la referencia y las células de medición. El gas en la célula de medición absorbe la luz infrarroja, atenuando la energía que cae sobre el detector. Esta energía atenuada se compara con la señal no atenuada de la célula de referencia. La diferencia es proporcional a la cantidad y la concentración de gas en la celda de medición. Las desventajas de los sensores NDIR son que son voluminosos y caros.

**Sensores de CO<sub>2</sub> de fibra óptica** La fibra óptica es otro método óptico para detectar CO<sub>2</sub>. Estos tipos de sensores se llaman optodos. Los sensores de fibra óptica contienen una capa de detección química en la punta de una fibra, que cambia las propiedades ópticas en respuesta al CO<sub>2</sub>. Cuando el elemento sensor está expuesto a CO<sub>2</sub>, crea un cambio en la absorbancia o la reflectancia de la película.

Después de la exposición, el punto de detección se examina mediante un diodo emisor de luz ámbar (LED) con emisión de pico a la longitud de onda especificada correspondiente a la forma básica del reactivo. La luz LED que brilla a través de la película genera calor en el punto por la decadencia no radiactiva de los estados excitados, dando como resultado una expansión del punto y un esfuerzo sobre la película de polímero. Esto crea una carga sobre la película, y la carga se correlaciona con la concentración de gas CO<sub>2</sub>.

La ventaja del sensor de gas de fibra óptica es que es químicamente inerte y no es sensible a la presencia de otros gases en el fondo. Un sensor de gas de fibra óptica tiene el inconveniente de usar lentes, lo que resulta en la interferencia de la transmisión de la luz en el tiempo debido



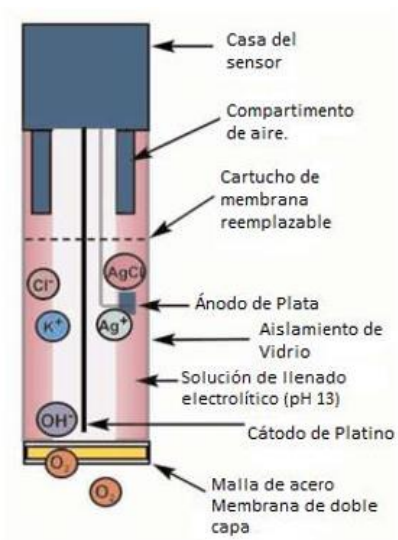
al polvo o la huella de CO<sub>2</sub> (hollín). Por lo tanto, un sensor de fibra óptica necesita limpieza frecuente para el funcionamiento continuo. Los equipos avanzados de lectura avanzada son necesarios para detectar el cambio en la punta de la fibra.

**Sensores de óxido metálico** Un sensor de gas de óxido metálico consiste en una capa sensible (material de detección) depositada sobre un sustrato provisto de electrodos para la medición de las características eléctricas. El elemento sensor es calentado por su propio calentador, que está separado de la capa de detección y de los electrodos por una capa aislante. Este elemento calefactor puede ser un alambre de platino o de aleación de platino, un óxido metálico resistivo o una fina capa de platino depositado.

En presencia de gas, el óxido metálico hace que el gas se disocie en iones o complejos cargados, lo que da lugar a la transferencia de electrones. Este cambio en la conductividad está directamente relacionado con la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en el medio ambiente, resultando en la identificación y determinación cuantitativa de la concentración de gas. Típicamente, el sensor producirá una señal muy fuerte a altas concentraciones de gas.

**Medición de oxígeno disuelto.** La cantidad de Oxígeno disuelto en el agua es normalmente expresada en partes por millón (ppm) por peso y es debido a la solubilidad de oxígeno de la atmosfera que nos rodea. Es importante recordar que el oxígeno disuelto refiere al oxígeno gaseoso disuelto en el agua, y no debe ser confundido con el oxígeno que es hallado en las moléculas de agua.

El éxito de los electrodos de membrana en la determinación del Oxígeno disuelto proviene de la separación de electrodos y electrolitos de la muestra debido a una membrana semipermeable. Esta membrana actúa para proteger el electrodo de la contaminación permitiendo el paso únicamente a los gases y en particular, al oxígeno. Particularmente, en la técnica de la membrana amperométrica, los electrodos son conducidos por un voltaje polarizante externo.



**Figura 2.8** Sensor de Oxígeno Disuelto Típico.

El flujo de la corriente entre los electrodos puede ser correlacionado a la cantidad de oxígeno presente en el canal. En un sensor común (Figura 2.8), dos electrodos, un cátodo de platino y un ánodo de plata son sumergidos en una solución electrolítica preparada y separados de la muestra a ser medida por una membrana de gas permeable. La transferencia de oxígeno que cruza la membrana es proporcional a la presión parcial del oxígeno en el fluido.

La reacción que toma lugar en el ánodo es la oxidación de la plata al cloruro de plata. Esta reacción es compensada en el cátodo de platino por la reducción de las moléculas de oxígeno a iones de hidrógeno. La corriente resultante es directamente proporcional a la cantidad de oxígeno contenida en el medio.

Válvulas y actuadores. Una de las maneras en que se logra el control de los biorreactores es creando una interacción entre los sensores y los actuadores. Es importante para nuestro caso, contar con actuadores como válvulas para facilitar el transporte de fluidos, su paso por ciertas áreas y su estrangulamiento en algunas otras. Al menos el 90% de todos los canales de salida analógicos terminan en una válvula de control automático y Aproximadamente el 50% de salida discretos terminan en una válvula de aislamiento automático.

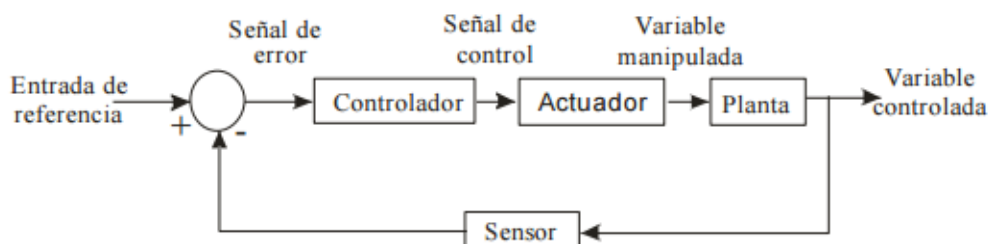
## 2.4 Sistema de control

El control manual es simple de implementar y requiere de un ser humano para operar los dispositivos como bombas, motores y válvulas. En los últimos años el control automático ha adquirido gran importancia en nuestra vida diaria ya que mejora la productividad y reduce la carga del ser humano de realizar operaciones manuales que pueden ser pesadas, peligrosas, repetitivas y rutinarias.

Se denomina sistema de control al conjunto de elementos conectados de forma que permiten controlar una o varias variables de un proceso denominado planta o sistema. La planta puede ser cualquier objeto físico que se va a controlar como por ejemplo: hornos de calefacción, reactores químicos, naves espaciales, etcétera. En un sistema de control en lazo abierto la salida no afecta la acción de control. No se mide la salida ni se retroalimenta para compararla. Estos sistemas de control consisten de dos etapas: el controlador y el sistema controlado.



*Figura 2.9 Sistema de control en lazo abierto.*



*Figura 2.10 Sistema de control en lazo cerrado.*

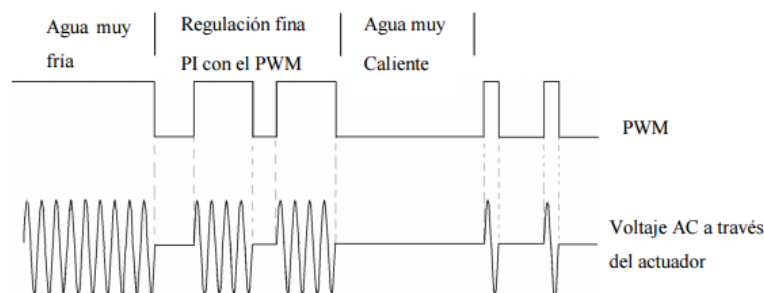
Para que el control en un sistema sea exacto necesita una conexión entre las señales de salida y entrada. La señal controlada debe ser retroalimentada para reducir el error y lograr un mejor control del sistema. A los sistemas con una o más retroalimentaciones se les denomina sistemas de lazo cerrado. En un biorreactor, es indispensable la retroalimentación con el sistema, ya que esto permite el crecimiento de la microalga en tanto asegura la estabilidad y el mantenimiento de las condiciones óptimas del sistema.

Control de potencia: on/off El control llamado on/off, somete al actuador a dos estados de funcionamiento. Estos sistemas de control son los más sencillos y económicos de implementar, pero tiene la desventaja de que producen oscilaciones, por lo cual no se utilizan en muchos procesos. Para evitar las oscilaciones que presenta el controlador on/off cuando el error es cero se le añade una histéresis o zona muerta.

La histéresis sirve para evitar las conmutaciones frecuentes (oscilaciones) de un sistema de control on/off, es decir, para estabilizarlo. Estos controles funcionan bien si la dinámica del proceso varía lentamente y si su tiempo de retardo es mínimo. Para sistemas de calefacción se tiene un tiempo de retardo grande, lo cual ocasiona que se tenga inercias térmicas elevadas, por lo que el control on/off suele ser insuficiente para lograr un control preciso de la temperatura.

Control de potencia por ciclos: El control de potencia tipo integral o de ciclos enteros es un tipo de control de potencia usado principalmente en aplicaciones que tienen una inercia mecánica o térmica alta, por ejemplo: control de velocidad de motores con cargas mecánicas grandes o en hornos industriales. A esta técnica de control también se le conoce como PWM, dado que el número de ciclos que permanece encendido el calefactor depende del ancho de pulso de la señal de control.

La opción PWM consiste en tomar un periodo de la línea de corriente para posteriormente variar la potencia dejando pasar cierto número de ciclos. Si se deja pasar toda la energía al actuador durante todo el ciclo de trabajo del 100 % del PWM es equivalente a aplicar toda la potencia neta al calefactor. Por lo tanto si se le aplica una energía al actuador durante medio ciclo de trabajo del PWM y medio ciclo de trabajo se mantiene apagado es igual a aplicar una potencia equivalente al 50 %.



**Figura 2.11** Respuesta del PWM.

En la Figura 2.11 se esquematiza la suposición del control de la temperatura del agua. Si el agua se encuentra fría se deja pasar toda la potencia al calentador. En caso de que se encuentre dentro del rango que se desee controlar se dejan pasar los ciclos necesarios para mantener la temperatura deseada. Finalmente, si el agua se encuentra muy caliente no se le suministra energía al calefactor.

Se requiere diseñar un controlador para determinar la relación de periodos encendidos en función del error de la temperatura. Este controlador puede ser del tipo Proporcional Integral (PI) o Proporcional Integral Derivativo (PID).

Control Proporcional – Integral (PI): El control proporcional (P) relaciona la señal de salida del controlador con la señal del error, es decir, la acción del control es proporción a la señal de error. El control proporcional es en esencia un amplificador de ganancia ajustable, ya que existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición final de control.

La acción del control integral (I) es corregir el error mediante una acción integral. El control integral proporciona una señal que es función de la historia de la señal del error (la integral es una operación acumulativa en el tiempo), permitiendo obtener una señal de control diferente de cero, aunque la señal del error sea cero. Este control genera una señal resultante de la combinación de la acción proporcional e integral conjuntamente. La ecuación 2.1 describe matemáticamente la acción del controlador PI:

$$PID = k_p * e(t) + \frac{k_i}{T_i} * \int_0^t e(t) d(t)$$

*Ecu. (2.1)*

en donde: e error (muestra actual – muestra anterior); t tiempo;  $k_p$  constante proporcional;  $k_i$  constante integral;  $T_i$  tiempo integral, generalmente son minutos.

Un control PI es adecuado para procesos donde la dinámica del sistema es esencialmente de primer orden (control de nivel de un solo tanque, tanques de mezclado, reactores perfectamente agitados, etcétera).

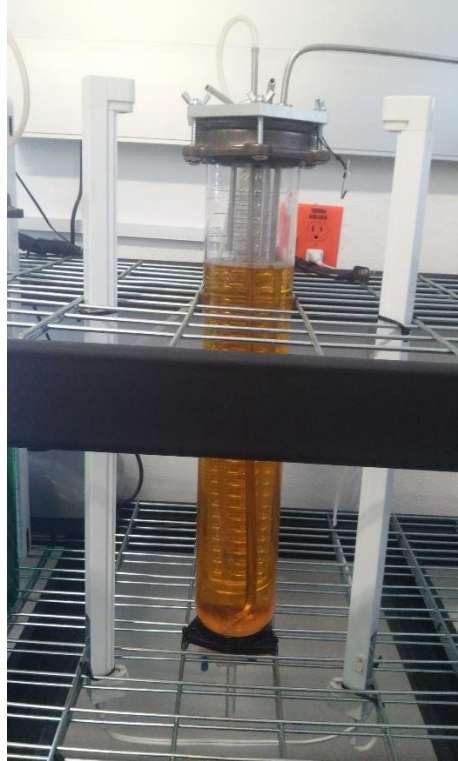
## 3 Desarrollo

### 3.1 Descripción del sistema realizado

Este equipo consiste en una unidad de producción de microalgas. El biorreactor tiene una capacidad de 4 litros y está fabricada en vidrio de una sola pieza. Los tubos que se encuentran dentro del biorreactor son de acero inoxidable que nos sirve para aeración, toma de muestras, de desfogue y sensores. El sistema de la brida se compone de una parte de acero cromado y aluminio al 100% y una capa de goma para aislar el vidrio de los metales.

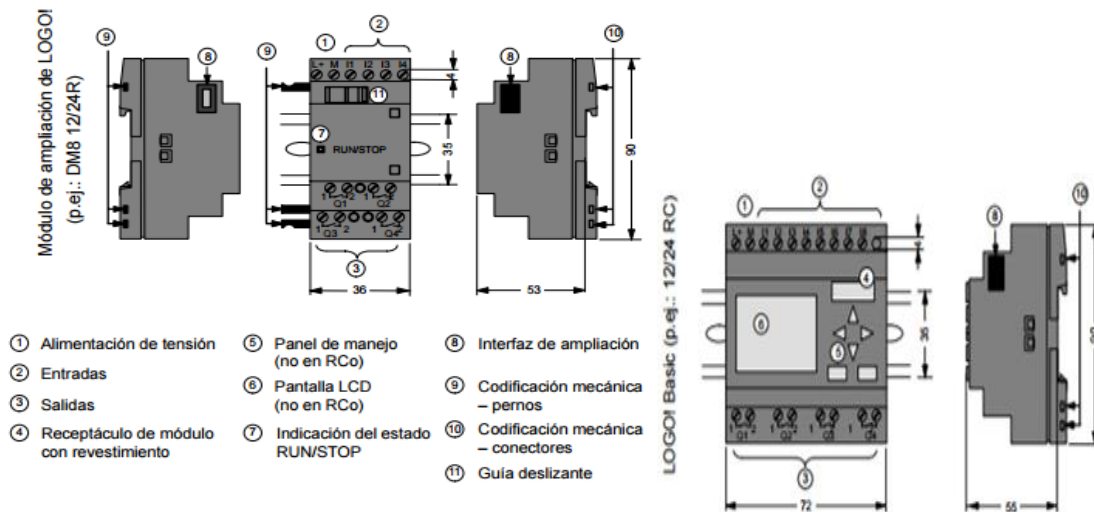
Se utilizó una mampara de cristal para hacer la circulación de las microalgas, junto a la mampara se colocó la iluminación interna aislada para poder estar en el medio en el que se

encuentra. El biorreactor se encuentra montado en un estante donde hace soporte a la iluminación externa.



**Figura 3.1** Montaje del biorreactor.

Para la parte del control hicieron falta elementos fundamentales por lo que no se pudo realizar un control de lazo cerrado como se pretendía en un principio por lo que se implementó el control de lazo abierto, teniendo como Controlador el LOGO! 230RC y como extensión DM8 230R a que cuentan con una tensión de entrada de 115...240 V CA/CC con un margen admisible de 85 ... 265 V CA 100 ... 253 V CC el consumo en corriente de 115 V CA - 10 ... 40 mA; 115 V CC 5 ... 25 mA.



**Figura 3.2** LOGO! 230RC y DM8 230R.

Puede conectar al módulo una termorresistencia Pt100 alternativamente con técnica de conexión a 2 ó 3 hilos. Nosotros ocuparemos la técnica de conexión a 2 hilos, deberá aplicar en el módulo un puente de cortocircuito entre los bornes M1+ y IC1 o entre M2+ y IC2. En este tipo de conexión no se produce una corrección del fallo provocado por la resistencia óhmica del cable de medición. 1 ohm de resistencia equivale a un fallo de medición de +2,5°C.

Técnica de conexión a 2 hilos

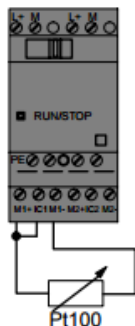


Figura 3.3 Conexión del sensor Pt100.

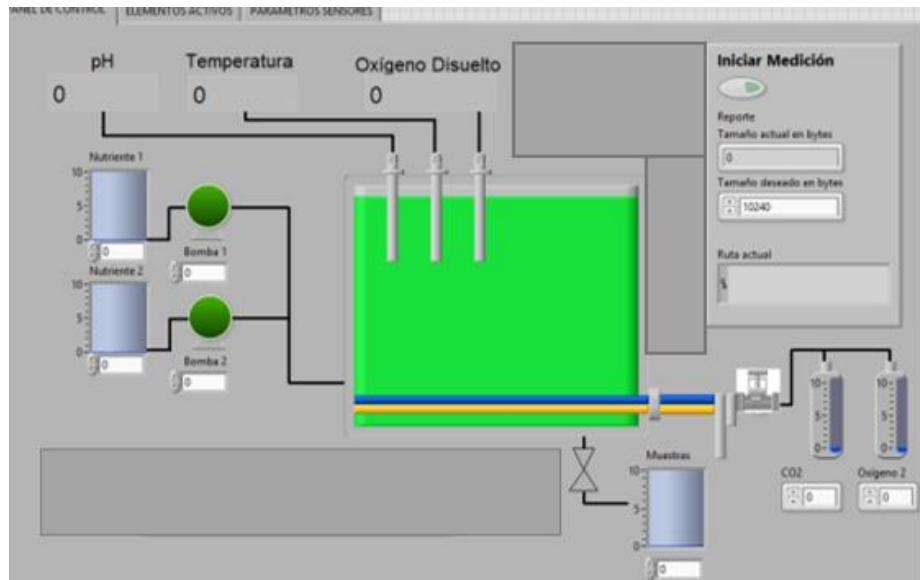
### 3.2 Diseño de la interfaz máquina.

Actualmente los equipos electrónicos tienen la ventaja de tener una interfaz con la computadora, aumentando significativamente sus prestaciones. Para el caso del biorreactor, una interfaz con la PC mejorará las prestaciones del proceso para el usuario. Algunas de las ventajas son: obtención de historiales de las mediciones de las variables más importantes que influyen en la microalga, interfaz gráfica amigable con el usuario y paneles de control.

El software NI LabVIEW puede comunicarse con cualquier controlador lógico programable (PLC) de diferentes formas. OPC (OLE for Process Control) define el estándar para comunicar datos en tiempo real entre los dispositivos de control de una planta y las interfaces hombre-máquina (IHM). Los servidores OPC están disponibles virtualmente para todos los PLCs y para PACs (Programmable Automation Controller).

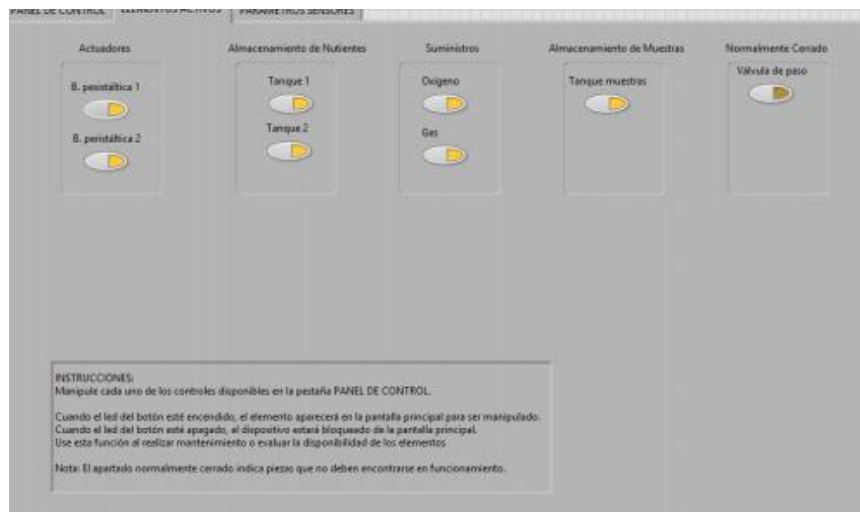
La aplicación desarrollada en LabVIEW realiza la función principal de comunicar el Escritorio / Laptop con PLC LOGO! (Es decir, vincular National Instruments con Siemens). El software realiza las siguientes funciones: supervisa y muestra todos los canales del LOGO!; elegimos el puerto de comunicación; el usuario puede guardar en un archivo todos los datos, cada período configurable. Lo descrito en el 3.1 nos permite llevar como directriz para la creación de la interfaz hombre máquina. El panel se plantea a continuación.

En el panel de control, se establece el orden de los elementos de acuerdo a la Figura 3.4. Este establece el orden de los siguientes elementos: Los datos de medición se muestran en la parte superior, utilizando el principio de lectura de barrido. Se muestra el orden y la conexión de los elementos en el entorno físico; el cuadro de inicio de operación, el cual indica en que momento comenzar la adquisición, y en qué momento conviene detenerse. Así también contiene la generación de un archivo en el cual el usuario puede determinar el tamaño del archivo a generar y observar el tamaño y la ruta donde este se encuentra.



**Figura 3.4** Panel de control con labview.

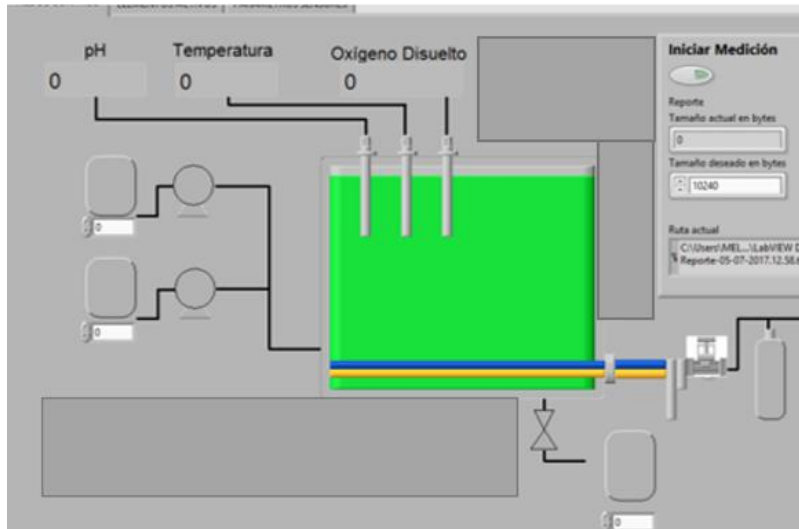
El barrido continúa hacia abajo mostrando los tanques de llenado y la válvula mecánica que permite su flujo; los datos del botón de CO2 y Oxígeno muestran datos de tasa manuales de flujo que el operador puede introducir para generar un reporte o una base de datos relevante para el muestreo de los diversos elementos del sistema; el logo de la universidad, y de la carrera de Ingeniería Industrial, se encuentran en la parte inferior izquierda, con el fin de institucionalizar los parámetros del HMI. Se utiliza el código de colores de tuberías para señalar la inyección de aire al sistema y la inyección de CO2.



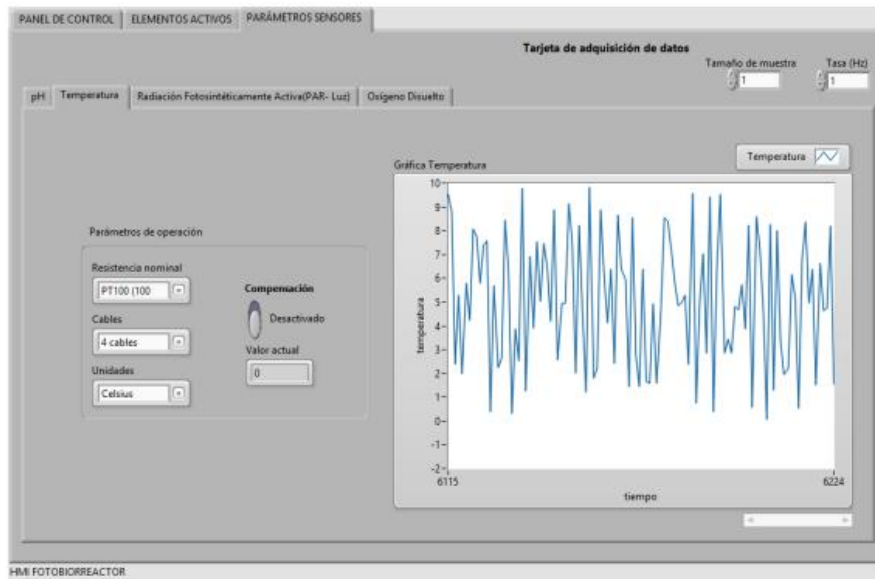
**Figura 3.5** Elementos activos del HMI.

Para la segunda pantalla, en la Figura 3.5, se plantea el principio de la utilización única de los elementos del sistema. Mediante esta pantalla se plantea el uso de los elementos que se encuentran activos o de los cuales dispone el sistema. Cuando un botón se apaga, el elemento escogido desaparece del sistema. El apartado normalmente cerrado refiere a equipos que tienen dos condiciones, encendido/apagado o cerrado/abierto. Se muestra apagado pues la válvula se encuentra cerrada.





**Figura 3.6** Elementos inactivos en el HMI.



**Figura 3.7** Parámetros de operación de los sensores.

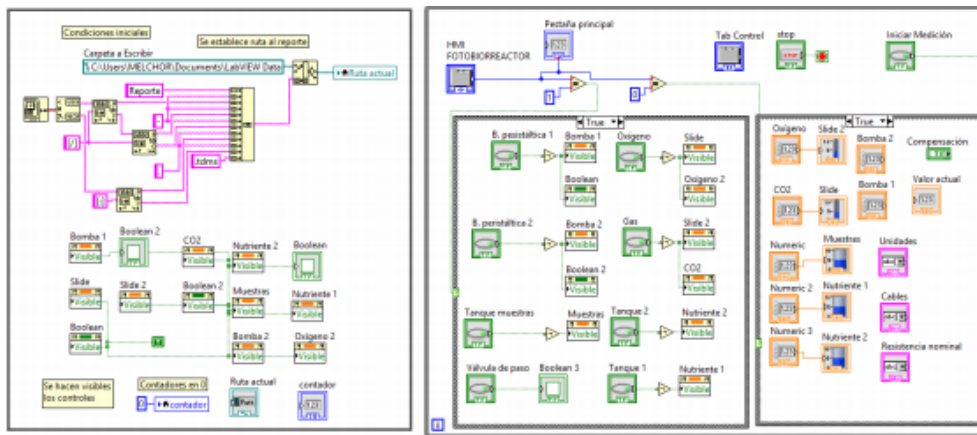
Para la última pestaña, en la Figura 3.7, se despliega la medición del sensor propiamente a detalle. Los parámetros de operación para cada sensor, son particulares y varían. En el siguiente ejemplo se despliegan los parámetros que inciden para la correcta medición del sensor de Temperatura. La resistencia nominal del sensor (100 ó 1000 ohms) dependiendo si es PT100 o PT 1000.

El número de cables de conexión (2,3 y 4); las unidades en las cuales se despliega la información (Celsius, kelvin, Fahrenheit); el valor de compensación, dado por el fabricante; el valor actual, como dato relevante para la toma y análisis de resultados. Así también se muestran la tasa de muestreo, en Hz, recordando que 1 Hz=1 ciclo / segundo, o lo que es lo mismo, una medición en 1 segundo.



Otro dato importante es el tamaño de la muestra, donde el usuario puede determinar cuántas muestras requiere de acuerdo a la tasa en Hz que necesita. Es importante mencionar que esta tasa es uniforme para todo un módulo de adquisición, es decir, que los sensores conectados a un módulo tendrán la misma frecuencia y el mismo tamaño de la muestra.

Así también se muestran la tasa de muestreo, en Hz, recordando que 1 Hz=1 ciclo / segundo, o lo que es lo mismo, una medición en 1 segundo. Otro dato importante es el tamaño de la muestra, donde el usuario puede determinar cuántas muestras requiere de acuerdo a la tasa en Hz que necesita. Es importante mencionar que esta tasa es uniforme para todo un módulo de adquisición, es decir, que los sensores conectados a un módulo tendrán la misma frecuencia y el mismo tamaño de la muestra.

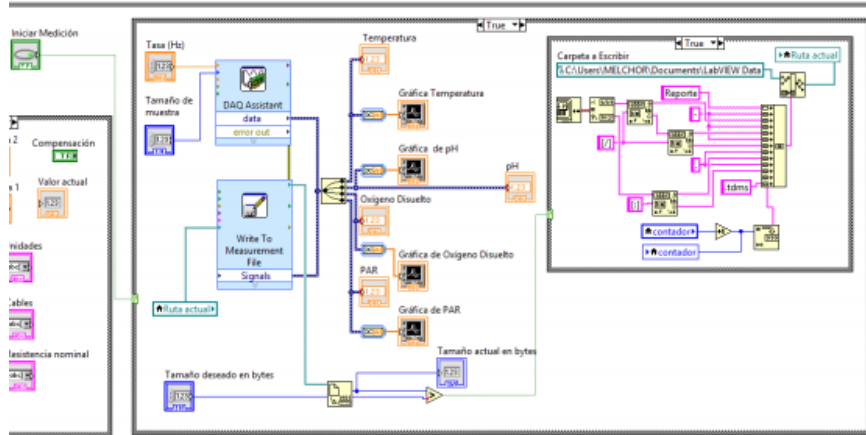


**Figura 3.8** Programación de la interfaz HMI.

En la Figura 3.8: Del primer lado derecho se tiene un cuadro, esta es la primera etapa del sistema. En él, se crea el archivo donde los datos serán almacenados, esto sin necesidad de que el usuario necesite hacerlo. Se da nombre, tipo de archivo y ruta, la cual es almacenada para dar continuidad a las mediciones. Se establecen activos todos los elementos de la pantalla principal mediante la propiedad visible.

A continuación, en el recuadro derecho se hacen válidas las entradas a las pestañas del HMI. En estas, con el fin de ahorrar el procesamiento, solo se activan cuando el sistema detecta que el usuario navega entre las pestañas del sistema. En caso que el usuario no se mueva entre las pestañas, la única que permanecerá activa es la pestaña que se despliega ante su vista.

Los datos que se obtuvieron mediante el Driver DAQmx. Este driver permite una obtención de los dispositivos que se conectan en el módulo de adquisición de datos. Asimismo, permite reconocer el tipo de módulo de adquisición conectado al sistema y configurar los tipos de mediciones que el módulo es capaz de aceptar. Se estableció para este caso 2 señales de corriente, sensor de pH y de oxígeno disuelto respectivamente, una señal de voltaje para el sensor de PAR y así también una señal de temperatura para el sensor de PT100.



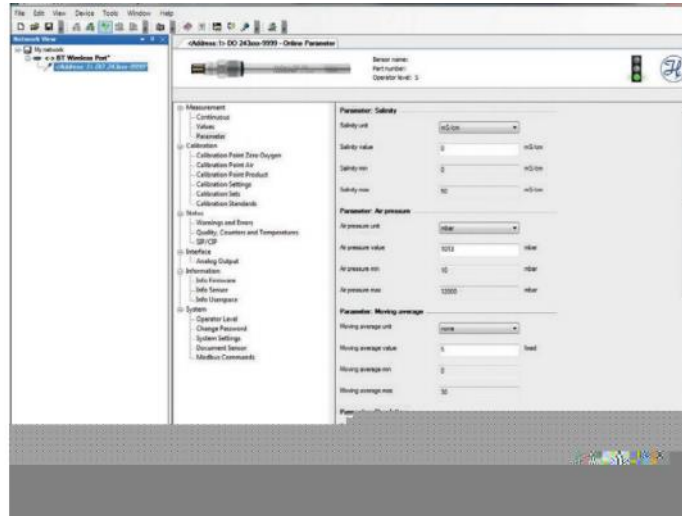
**Figura 3.9** Obtención de datos en el HMI.

En la Figura 3.9, sólo cuando el usuario activa el botón de iniciar medición, el asistente comenzará la captura de los datos. En caso contrario no realizará acción alguna. En esta figura también es posible ver como los datos son continuamente desplegados en las gráficas, de tal manera que pueden ser visualizadas a detalle por el usuario. Así también, se muestra el caso de escritura del archivo y su sobre escritura de acuerdo con los permisos que fueron establecidos en la pantalla principal.

### 3.3 Configuración de las variables de medición.

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema de instrumentación, se llevaron a cabo una serie de pruebas para determinar el cumplimiento de la medición. El despliegue de las acciones llevadas a cabo se detalla a continuación. Dada la naturaleza del sensor seleccionado, uno de ellos presenta una configuración de fábrica que asegura la estabilidad de las mediciones del medio. Dicho dispositivo es el sensor de Temperatura.

En el caso del sensor de pH y del oxígeno disuelto, se requiere una configuración adicional para adecuarlos al medio de trabajo. Esto es posible mediante el uso del software HDM, La configuración del sensor de oxígeno disuelto mediante HDM. Se llevo a cabo el siguiente orden. Reconocimiento del sensor; se conecta el sensor a la fuente de alimentación utilizando el cable de alimentación del sensor, y se inicia el HDM; Se abre "Catálogo de dispositivos" en la vista; Se actualiza y añade el "Modbus USB Port"; Se buscan los sensores disponibles; Se selecciona el sensor VisiWater, este debe aparecer en negritas, como se muestra en la Figura 40.



para la evaluación del sensor de Oxígeno disuelto, se utilizó el software que el proveedor facilita, de nombre Hamilton Device Manager (HDM). El proceso que se siguió, consta de 6 etapas: primero se conecta el sensor al software, este permite la detección automática del mismo; segundo se rellenan los datos de acuerdo a las especificaciones del proveedor, para permitir una configuración del sensor.

Tercero el software mostró el punto de referencia a partir del cual se decide calibrar el sensor; cuarto dado que el sensor arroja una señal directa de 4 a 20 mA, este se conectó directamente a la tarjeta de adquisición de datos; quinto se toma el punto de referencia dado por el software para compensar de acuerdo a la señal que el módulo de adquisición arroja; sexto finalmente se validó la señal dada por el software contra la señal arrojada por la interfaz hombre máquina.

## 4 Conclusiones

Con el control de un biorreactor se tiene un primer acercamiento a la instrumentación de sistemas de tipo industrial y se describe el procedimiento que se lleva a cabo para la automatización de un proceso. Para esto, en primer lugar, se conoció el producto, los parámetros de crecimiento, las características del medio del proceso a automatizar.

Las variables que mayor impacto tienen sobre este proceso son el pH, pues un valor básico asegura el crecimiento, la temperatura, que asegura un medio bajo el cual la microalga puede desarrollar sus procesos fotosintéticos, la radiación fotosintética activa asegura el nivel de captación de luz por cada microalga, y el nivel de aeración, que amenaza la supervivencia del cultivo.

Posterior a ello se seleccionó el hardware y el software con base en la capacidad del proceso, los tipos de señales y las variables a medir, esto con el fin de crear una HMI capaz de satisfacer los requerimientos del operador y del proceso. Una vez hecho lo anterior se propusieron los parámetros bajo los cuales operará el sistema de producción, es decir, la programación bajo la cual es posible realizar la adquisición de las variables de prioridad para el proyecto.

Finalmente se realizaron pruebas para verificar el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo. Dicho esto, se mejoró la interfaz de usuario para el control de la planta en la plataforma de programación LabVIEW. Ahora, la interfaz de usuario creada es totalmente amigable con el usuario. En ella, se hizo un modelo representativo del fotobiorreactor de cultivo de microalgas tomando en cuenta ubicación de la información, el manejo del color, la normativa aplicable de tal manera que se crea un entorno institucionalizado.

En resumen, con este trabajo se conocen diversos elementos que son usados a nivel industrial, se aprende sobre las características eléctricas que manejan sensores y el controlador, se plantea un modelo de adquisición utilizado en sectores, se usan equipos y herramientas de programación que van a la vanguardia en el tema de automatización de procesos, se plantea el monitoreo de las condiciones del fotobiorreactor a distancia, se propone una interfaz hombre-máquina que simplifica la comprensión y el entendimiento del proceso de producción de microalgas y se dejan asentadas las bases para modificar o crear otros esquemas de monitoreo, y en un futuro, con la implementación de actuadores, realizar un sistema propio de control.

## Referencias Bibliográficas

- [1] <http://www.conacyt.gob.mx/index.php/sni/fichas/2014-7/7286-213764-ficha.../file>
  - [2] [http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/11686](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/11686).
  - [3] <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%207/4.html>
  - [4] [http://www.dicv.csic.es/arxius/PZ\\_016\\_200931036\\_Asensio\\_2012-10-05.pdf](http://www.dicv.csic.es/arxius/PZ_016_200931036_Asensio_2012-10-05.pdf)
  - [5] <http://aqualgae.com/wp-content/uploads/2015/10/Folleto-Lab-Model-2016>.
- F.-S. J. Molina E, “Uso de microalgas como alternativa a las tecnologías disponibles de mitigación de emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>,” *Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal*, vol. 2, no. 2, pp. 93–106, 2011
- H. I. Hernández Martínez, Á. F. González Hernández, and J. N. García Matías, “Evolución de la instrumentación electrónica programable,” *Temas Cienc. y Tecnol.*, vol. 10, pp. 33–42, 2006
- A. F. Severinghaus, J.W., & Bradley, “Electrodes for blood pO<sub>2</sub> and pCO<sub>2</sub> determination,” *J. Appl. Physiol.*, vol. 13, pp. 515–520, 1958.
- S. Tebbani, F. Lopes, and G. Becerra Celis, “Nonlinear control of continuous cultures of *Porphyridium purpureum* in a photobioreactor,”
- P. Pere and A. Granollers, “Diseño y Automatización Industrial,” p. 30, 2007.
- M. Moreno, “Controlador Lógico Programable (PLC),” *Autom. Micromecánica s.a.i.c*, vol. I, p. 84, 2002.

D. Fitchett, "State of technology report: PLCs / PACs," Control design for machine builders, no. March, p. 45, 2015

P. Pere and A. Granollers, "Diseño y Automatización Industrial," p. 30, 2007.

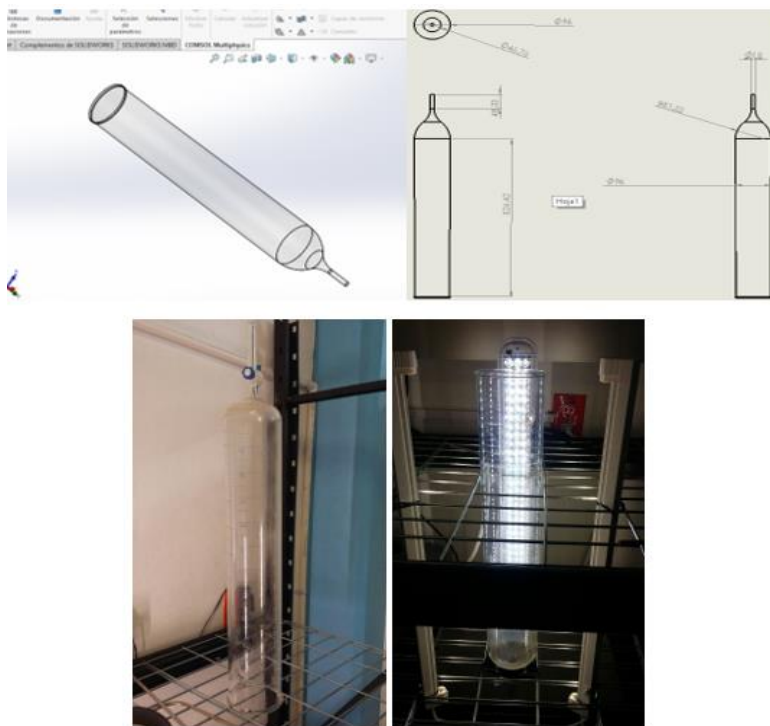
M. Moreno, "Controlador Lógico Programable (PLC)," Autom. Micromecánica s.a.i.c, vol. I, p. 84, 2002.

National Instruments, "cDAQ 9188," 2017. [Online]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/208990>. [Accessed: 25-May2017].

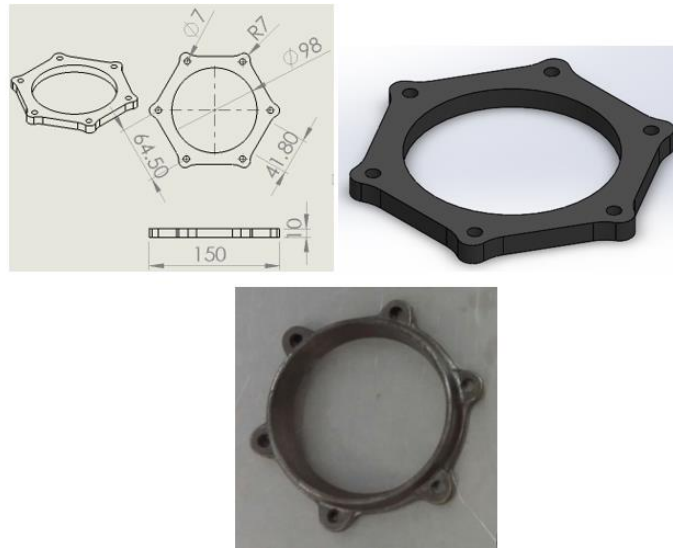
## Anexos

### Anexo A: Diseño del biorreactor.

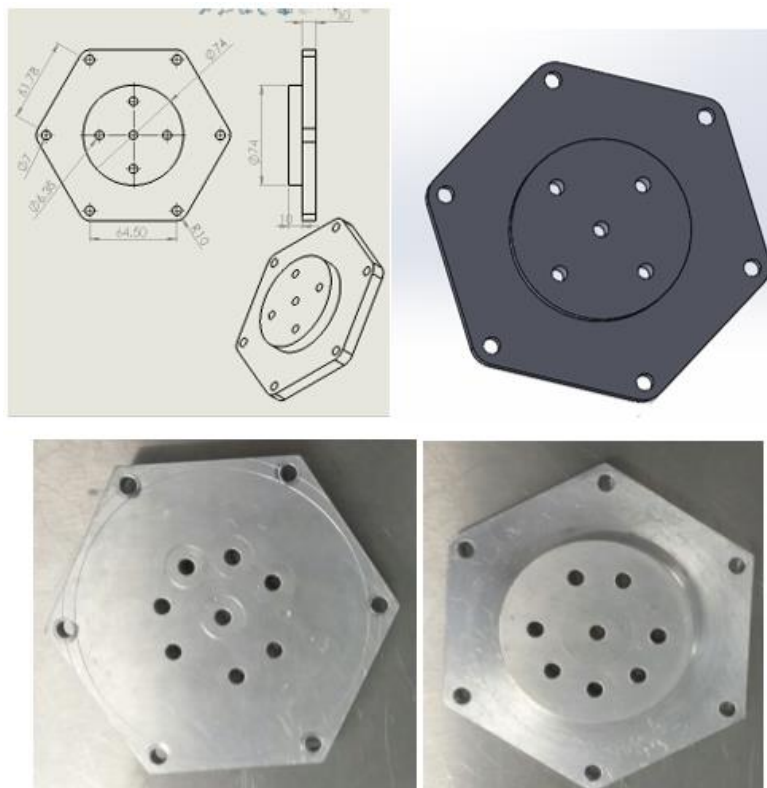
A continuación, se muestra los pasos que seguimos para tener nuestro biorreactor. Para poder hacer nuestro biorreactor pasó primero por la etapa de diseño donde ocupamos el programa de solidworks ya que para estos diseños se nos hizo más fácil y practico, y con la ventaja de que se pueden simular fluidos en pocas palabras es didáctico.



**Figura 6.4** Diseño y construcción del biorreactor.



**Figura 6.5** Diseño y construcción de la brida.



**Figura 6.6** Diseño y construcción de la tapa de la brida.



Para la base donde se encontrará el biorreactor se compró el material y ensamblamos parte por parte para tratando de hacerlo robusto y soporte el peso que llegue a tener.



**Figura 6.1** Construcción de la base para biorreactores.

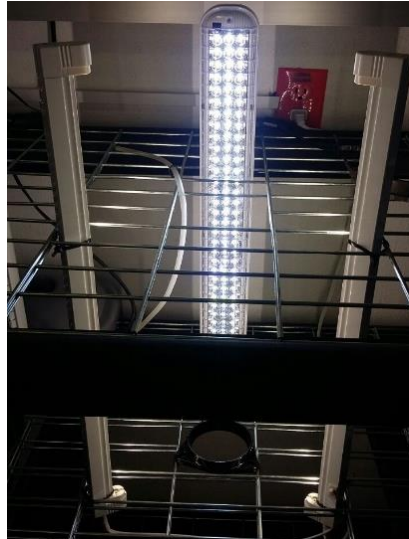
Moldeamos la malla para que los biorreactores entraran de forma adecuada y segura, la primera malla sostiene al biorreactor y la segunda nos permite que no tenga movimiento y quede fija.



**Figura 6.2** Ensamble de biorreactores a la base.

Ocupamos las lámparas de leds ya que consumen aproximadamente un 80% menos energía eléctrica que un foco común. El flujo de la luz en las lámparas LED permite dirigirla al área que se desee sin perder energía en haces de luz que van en otras direcciones (como es el caso de los focos comunes) así se incrementa la uniformidad lumínica y se reduce la pérdida de iluminación entre fuentes de luz.

Con las lámparas de leds se ha conseguido una mayor eficiencia lumínica, llegando a tener hasta 150 lúmenes por watt en las lámparas de alta eficiencia y de 80 lúmenes por watt en las comunes. Con esto se optimiza el uso de la luz emitida y se reduce el consumo de energía y la contaminación. En consecuencia, las lámparas LED tienen un mayor rendimiento luminoso útil (en porcentaje de lúmenes por watt).



*Figura 6.3 Sistema de iluminación.*



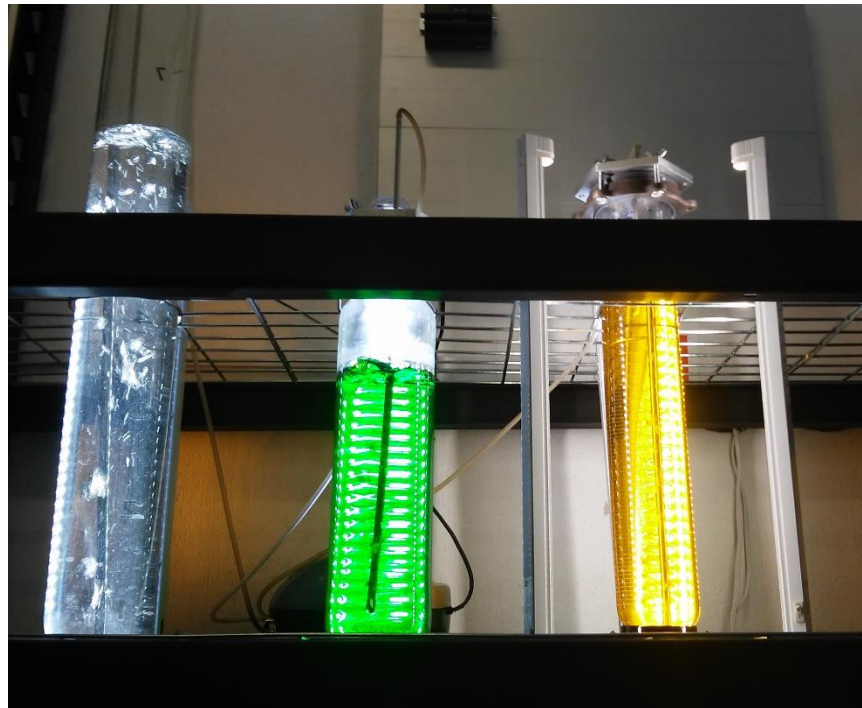
*Figura 6.7 Elementos que permiten controlar y medir variables.*





*Figura 6.8* Termino del montaje del biorreactor.

En la figura 6.9 se muestra como que el montaje de los tres biorreactores sobre la base de metal, ya con sus respectivas bridas y su respectivo sistema de iluminación.



*Figura 6.9* Montaje de los tres biorreactores.