

# **INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE**

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1976.

---

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano

MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES



## **SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE VARIABLES FISICOQUÍMICAS EN UN PROTOTIPO PARA FAVORECER LA APROPIACIÓN SOCIAL DEL CULTIVO DE SPIRULINA SPP**

Trabajo recepcional que para obtener el grado de  
MAESTRO EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES

Presenta: Carlos Cruz López

Tutor: Dr. David Vargas del Río

San Pedro Tlaquepaque, Jalisco. 3 Mayo de 2018.

Contenido

|  |    |
|--|----|
| <b>INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE</b> .....   | 1  |
| <b>SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS EN UN PROTOTIPO PARA FAVORECER LA APROPIACIÓN SOCIAL DEL CULTIVO DE SPIRULINA SPP</b> .....         | 1  |
| <b>TÍTULO. SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS EN UN PROTOTIPO PARA FAVORECER LA APROPIACIÓN SOCIAL DEL CULTIVO DE SPIRULINA SPP.</b> .... | 4  |
| <b>RESUMEN</b> .....   | 4  |
| <b>1. ACERCAMIENTO AL PROBLEMA DE LA PRODUCCIÓN SUSTENTABLE DE ALIMENTOS EN ZONAS URBANAS MEDIANTE ACUACULTURA</b> .....   | 5  |
| 1.1. Ecología, diseño ambiental y tecnología sustentable. ....   | 5  |
| 1.2. Hipótesis.....  | 10 |
| 1.3. Objetivo general .....  | 10 |
| 1.4. Objetivos específicos. ....   | 10 |
| 1.5. Alcances del trabajo.....   | 10 |
| 1.6. Producción de alimentos en áreas urbanas .....  | 11 |
| 1.7. Acuicultura urbana sustentable.....   | 14 |
| <b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....  | 16 |
| 2.1. Organismos unicelulares .....   | 16 |
| 2.2. Generalidades de las cianobacterias.....  | 18 |
| 2.3. Hábitat, reproducción y ciclo de vida.....  | 25 |
| 2.4. Acuacultivos de cianobacterias y microalgas .....   | 27 |
| 2.4.1. Sistemas abiertos de producción.....  | 29 |
| 2.4.2. Sistemas cerrados de producción.....  | 31 |
| 2.5. Composición química y potencial de alimentación.....  | 32 |
| 2.5.1. Proteínas .....   | 33 |
| 2.5.2. Carbohidratos. ....   | 34 |
| 2.5.3. Lípidos .....   | 35 |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.5.3.1. | Ácidos grasos (lípidos saponificables).....  | 36        |
| 2.5.3.2. | Lípidos insaponificables .....   | 37        |
| 2.5.4.   | Vitaminas.....   | 37        |
| 2.5.4.1. | Vitamina A.....  | 38        |
| 2.5.5.   | Minerales .....  | 38        |
| 2.5.6.   | Ácidos Nucléicos .....   | 39        |
| 3.       | <b>DISEÑO METODOLÓGICO .....</b>   | <b>40</b> |
| 3.1.     | <b>Definición del problema a abordar. Fundamentos biológicos y de control para el diseño del prototipo .....</b> | <b>40</b> |
| 3.1.1.   | Cinética de crecimiento.....   | 40        |
| 3.1.2.   | Definición de variables .....  | 42        |
| 3.1.2.1. | Temperatura .....  | 42        |
| 3.1.2.2. | Iluminación .....  | 42        |
| 3.1.2.3. | Agitación .....  | 43        |
| 3.1.2.4. | Nutrición .....  | 43        |
| 3.1.2.5. | pH .....   | 44        |
| 3.1.2.6. | CO <sub>2</sub> .....  | 45        |
| 3.1.3.   | Control digital de las variables.....  | 45        |
| 3.1.4.   | Estrategia de control.....   | 48        |
| 4.       | <b>DESARROLLO DEL PROTOTIPO: PLANOS MATERIALES Y ESTRATEGIA DE CONTROL .....</b>                                 | <b>50</b> |
| 5.       | <b>CONCLUSIONES.....</b>   | <b>70</b> |
| 6.       | <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>   | <b>72</b> |
|          | <b>ANEXO 1. Sistema de control del prototipo.....</b>  | <b>75</b> |

# **TÍTULO. SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE VARIABLES FISICOQUÍMICAS EN UN PROTOTIPO PARA FAVORECER LA APROPIACIÓN SOCIAL DEL CULTIVO DE *SPIRULINA SPP.***

## **RESUMEN**

El mercado actual obliga a las personas a consumir alimentos importados y producidos con agroquímicos que son insalubres y pobres en términos nutricionales. Son además productos caros, pues durante su producción y distribución intervienen numerosos intermediarios. Este modo de producción además implica altos niveles de degradación social y ambiental en las áreas rurales. Por consiguiente, es urgente para la sustentabilidad y la soberanía alimentaria generar sistemas de producción de alimentos alternativos y de calidad que estén disponibles a la población en general. La Spirulina, al ser un alimento de alta calidad nutricional y productividad potencial, podría contribuir a solucionar este problema; sin embargo, su producción requiere conocimientos especializados en acuicultura y gran cantidad de mano de obra. En este proyecto de investigación aplicada se emplean los recientes avances en automatización para controlar las variables fisicoquímicas y así contribuir en la apropiación social de la tecnología de la producción de Spirulina. El objetivo principal es la implementación de las variables, pero además, como ejemplo de aplicación, se realiza un prototipo que recircula agua y nutrientes, cosecha de manera automatizada, y controla los principales parámetros fisicoquímicos.

Palabras clave: Producción de alimentos, Spirulina, automatización, sistema productivo, control automático.

# **1. ACERCAMIENTO AL PROBLEMA DE LA PRODUCCIÓN SUSTENTABLE DE ALIMENTOS EN ZONAS URBANAS MEDIANTE ACUACULTURA**

## **1.1. Ecología, diseño ambiental y tecnología sustentable.**

El hombre todavía no es capaz de entender la complejidad de su medio ambiente. La especie humana forma parte de la esfera de vida en un sistema que abarca a todos los seres vivos del planeta, junto con los elementos de la naturaleza que son: aire, agua, suelo y su principal fuente de energía representada por el sol. Entre el hombre y la naturaleza debe existir una correlación que evite la degradación del entorno, seguida de la propia especie. Así, la complejidad del entorno abarca las interacciones biológicas, químicas y físicas que se dan en él, los sistemas de su hábitat, la respuesta y adaptación a su ambiente por los organismos y la composición de los factores abióticos (físicos y químicos) presentes (Yáñez, 1986).

No es posible considerar que los elementos del entorno actúan de forma aislada, pues su presencia implica una serie de interacciones e interdependencias recíprocas que resultan en una compleja relación simbiótica donde cada uno de los elementos forma parte de un todo. En la actualidad, para la comprensión de estas interacciones complejas entre el medio biótico y abiótico en la naturaleza, los científicos han implementado modelos simulados (Harding, 2006). En este sentido, la ciencia moderna es capaz de reconocer y simular las interacciones fisicoquímicas que son evidentes para estas características relacionales y de interdependencia.

Sin embargo, en muchas ocasiones ocurren cambios en las interacciones existentes entre organismos y su medio ambiente que por no ser tan perceptibles pasan inadvertidos. Por lo tanto, el hombre está aún muy lejos de entender completamente el funcionamiento de los ecosistemas; los complejos mecanismos e interacciones que en ellos ocurren son más complicados de lo que se piensa. Además, dado su nivel de complejidad, algunos fenómenos que se dan en la naturaleza como el agotamiento de recursos y la insustentabilidad urbana suelen abordarse desde una perspectiva lineal, causa-efecto, la cual también limita la forma de interpretar y enfrentar la problemática ambiental (Yeang, 1999).

Esta visión está inmersa en todos los aspectos de la vida moderna donde el modelo de desarrollo capitalista ha influido, a través de un crecimiento económico asociado a un desequilibrio ambiental. Sus efectos inciden en el deterioro ambiental y se manifiestan en distintas problemáticas: desastres ecológicos, pobreza, contaminación y las situaciones propias de la problemática urbana, como el exceso de población, abatimiento de recursos, etc. Es en las ciudades donde se presentan estos desequilibrios con más fuerza, y es ahí donde ocasionan alteraciones y

desconexiones con el entorno, que como consecuencia llevan a un deterioro del espacio regional. En este sentido, la ciencia de la ecología ha comprobado que el hombre debe respetar los aspectos físicos, químicos y biológicos de su medio ambiente, así como adaptarse a los ciclos de la materia y energía de la naturaleza, al reconocer la retroalimentación que se da en ella y su dinámica natural y abierta. De esta manera, se desarrollan mecanismos de autorregulación que ayudan a mantener un adecuado equilibrio en la interacción de la composición de las propiedades del medio ambiente (Bettini, 1998). Esta visión sistémica e integradora, ilustrada en la figura 1, inspira la innovación tecnológica de este Trabajo de Obtención de Grado (TOG).



Figura 1. Integración de los sistemas con su entorno (Yeang, 1999).

En los ecosistemas se presentan cuatro procesos ecológicos que son la base fundamental de los mismos: el ciclo del agua, los ciclos de nutrientes, el flujo de energía y la dinámica de las comunidades. Esta última implica que cuando en un ecosistema se presenta una perturbación, se da un cambio en la composición y estructura de un ecosistema. Yáñez (1986), considera que los diferentes tipos de componentes que influyen en el medioambiente pueden ser:

- a. Biológicos: La interacción que se da entre los organismos, los cuales determinan distintos tipos de relaciones entre ellos. Principalmente se da una relación biológica (alimento), en donde la supervivencia de una especie depende de otros seres vivos de los que se alimenta.
- b. Físicos: Los factores físicos que determinan las características ambientales, como el agua, relieve, temperatura, etc.
- c. Químicos: Los factores que impiden o favorecen el desarrollo de los organismos, como la salinidad, pH, oxígeno, dióxido de carbono, etc.
- d. Socioculturales: Es un factor en el que se sustentan las adaptaciones conductuales para establecer un grado de supervivencia, el cual está asociado a las especies superiores.

Estos factores se interrelacionan de forma compleja, como se ilustra de manera esquemática en la figura 2.

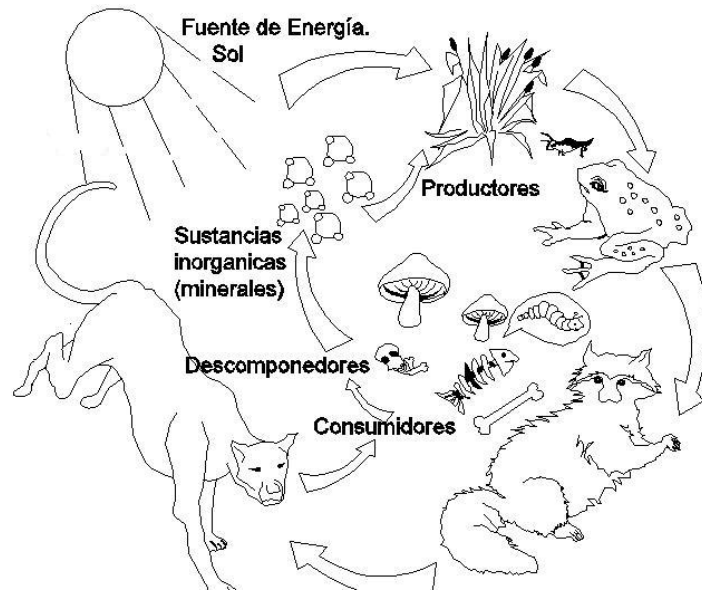


Figura 2. Interacción compleja de la vida con el medioambiente. Fuente: elaboración propia.

Al asociar estos principios básicos de la ecología al diseño de los ambientes humanos, se vuelve evidente que tanto la producción como el consumo deberían estar integrados de manera sistémica. Por ejemplo, el reciclaje de productos orgánicos podría restaurar la fertilidad del suelo y su capacidad de producción, el reciclaje del agua usada mantendría los niveles de agua subterránea y su pureza, o las plantas de tratamiento de las aguas residuales podrían operar como ecosistemas acuáticos: humedales hechos por el hombre que proporcionarían un nuevo y rico hábitat para una amplia variedad de especies desconocidas en la zona. El avance de la tecnología, por tanto, podría contribuir al equilibrio y no al contrario, como sucede actualmente. Esta visión que busca integrar la actividad humana en el diseño arquitectónico, mediante la armonización de la tecnología, la producción y el consumo, puede observarse en el modelo propuesto por Yeang (1999) presentado en la figura 3.

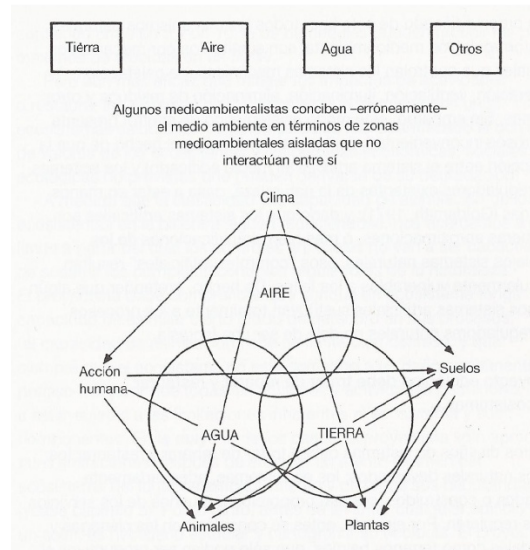
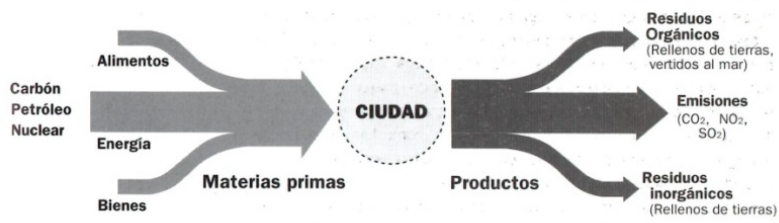


Figura 3. Proyectar con la naturaleza (Yeang, Proyectar con la naturaleza. Bases ecológicas para el proyecto arquitectónico, 1999).

De acuerdo con esta visión del diseño ambiental, el respeto al adecuado equilibrio ecológico debe comenzar primero en los lugares que habitamos; e inicia al analizar los aspectos naturales en su conjunto para comprender las complejas interconexiones que se dan en la naturaleza en los diferentes niveles tróficos, así como los diferentes mecanismos que existen en la interrelación de los factores bióticos y no bióticos de los ecosistemas. Así se puede tener un entendimiento más claro de las múltiples interrelaciones y conexiones entre los factores físicos y biológicos que se dan en el ambiente, para tener una buena base que permita comprender mejor la ecología y los múltiples procesos y mecanismos de equilibrio que se dan en la naturaleza. Sin embargo, esto no sucede en los espacios humanos habitados contemporáneos, especialmente en las ciudades. La figura 4 está basada en los trabajos de Rogers y Gumuchdjan (2000). En ella se contrasta el funcionamiento sistémico de la ciudad actual, como generadora de residuos y emisiones contaminantes, y consumidora de recursos naturales. En cambio, debajo se ilustra un modelo de ciudad en el que se presenta el reciclado y la reutilización de materias y productos, reduciendo la contaminación de residuos y, en última instancia, contribuyendo con la sustentabilidad. La innovación tecnológica de este TOG busca aportar también a este modelo de ciudad, donde la autoproducción estaría asociada al reciclado, dentro de un ecosistema urbano articulado con su entorno, lo que a la vez contribuiría a solucionar el problema alimentario que afrontan las ciudades.

Las ciudades de metabolismo **lineal** consumen y contaminan en grandes proporciones



Las ciudades de metabolismo **circular** minorizan las materias primas nuevas y acrecientan al máximo el reciclaje



Figura 4. Ciudades para un pequeño planeta (Rogers & Gumuchdijan, 2000).

## **1.2. Hipótesis**

Un sistema de producción de Spirulina automatizado, que pueda ser apropiado socialmente, contribuirá a solucionar la falta de soberanía alimentaria, la desnutrición y las externalidades asociadas a la producción de alimentos.

## **1.3. Objetivo general**

Realizar el diseño de un prototipo con un sistema de control automático de las variables fisicoquímicas: pH, temperatura, agitación, luminosidad, humedad, conductividad (salinidad), en acuicultivos para contribuir a la apropiación social de la Spirulina spp

## **1.4. Objetivos específicos.**

- Identificar los parámetros que optimizan la producción de Spirulina.
- Diseñar un sistema de control automatizado que incluya cosecha, para la producción de Spirulina a escala familiar.
- Construir un prototipo a escala basado en el punto anterior en el que, a manera de ejemplo, se implementan las variables fisicoquímicas en una escala familiar

## **1.5. Alcances del trabajo**

Construcción de un prototipo automatizado con control de las variables fisicoquímicas: pH, temperatura, agitación, luminosidad, humedad, conductividad (salinidad), para las condiciones de cultivo del alga spirulina que sirva a la optimización de recursos a través del mejor rendimiento por medio de un sistema de producción y su posible contribución a la producción sustentable de alimentos. Una de las variables que no se estará muestreando es la del Oxígeno (disuelto), por el elevado costo del mismo aunque si bien, el mecanismo a implementar en el desarrollo del proceso del cultivo es a través del sistema de paletas para la generación de turbulencia y a través de una bomba peristáltica.

## 1.6. Producción de alimentos en áreas urbanas

La Revolución Industrial trajo consigo un crecimiento exponencial de la población y con ella una excesiva demanda de recursos naturales, que detonó no solo en un incremento económico y de avances tecnológicos, sino que también generó un uso extensivo y la extracción irracional de los recursos naturales (Wuest, 2006). Este incremento poblacional transformó las condiciones del planeta al aumentar las necesidades de alimentación y vivienda, lo cual ocasionó un mayor incremento en los requerimientos del uso del suelo. De esta forma, las características del suelo cambiaron a extensas zonas para la agricultura y urbanización, lo que trajo consigo un desequilibrio ambiental. Estos cambios demográficos, al aumentar considerablemente las necesidades de la población, ocasionaron una alteración en el equilibrio de los procesos ecológicos.

La producción agrícola asociada a esta industrialización de la agricultura tecnificada diverge de los ciclos de materia y energía de la naturaleza. Esta diferencia radica en que la producción no se realiza como un ciclo, sino que hace uso de materiales y energía de manera exógena. Al proveer materiales desde lugares lejanos a donde se realiza la siembra, se incorporan insumos distintos del ciclo natural de materia y energía de los procesos biológicos del lugar, al mismo tiempo que se priorizan ciertos cultivos para el establecimiento de volúmenes de producción controlada que disminuyen la biodiversidad. Esta forma de producción es lineal, se abastece y depende de energía externa para su funcionamiento, sus recursos se contemplan como ilimitados y no se consideran las externalidades que implica esta forma de producción. El efecto negativo por el abatimiento de recursos naturales tiene como consecuencias la pérdida de la biodiversidad, el cambio climático y contaminación en el suelo, agua y aire. Así, el detrimento ambiental es un resultado de este tipo de producción (Yeang, El rascacielo ecologico, 2001).

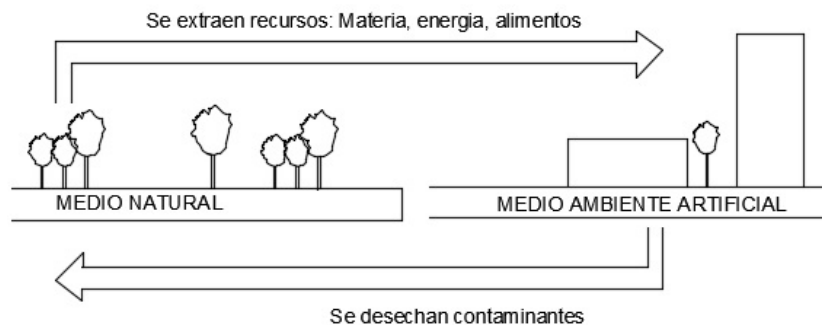


Figura 5. Modelo de desarrollo. Elaboración propia.

La forma en que se producen la mayoría de los alimentos ha influido en el deterioro ambiental. Existe una enorme presión sobre la utilización del suelo para este fin, las tierras de cultivo disminuyen debido a la globalización económica y la manera en que se comercializa la producción de alimentos; lo que ha ocasionado una homogeneidad y resistencia genética en ciertos cultivos como respuesta a los agroquímicos.

En la actual crisis medioambiental el hombre se encuentra ante la necesidad de reflexionar y cuestionarse estos aspectos de la producción en favor del equilibrio natural de su entorno. Es menester tomar medidas que sirvan para lograr una soberanía alimentaria. Para ello es fundamental recuperar la tradicional diversidad alimentaria, a través del impulso en la producción local y regional por medio del fortalecimiento de apoyos técnicos, científicos, económicos, de organización y de mercado para los productores locales todo ello con un enfoque orientado a lograr una mayor productividad y por ende una soberanía alimentaria (Alemán, 2014).

Es en este impacto ambiental en el que observamos que el actual modelo de desarrollo y sus distintas cadenas de producción han sido ineficaces para mantener el equilibrio ecológico. A continuación se representan las actividades preponderantes de este sistema económico y la visión que se tiene del mismo (ver fig. 6).

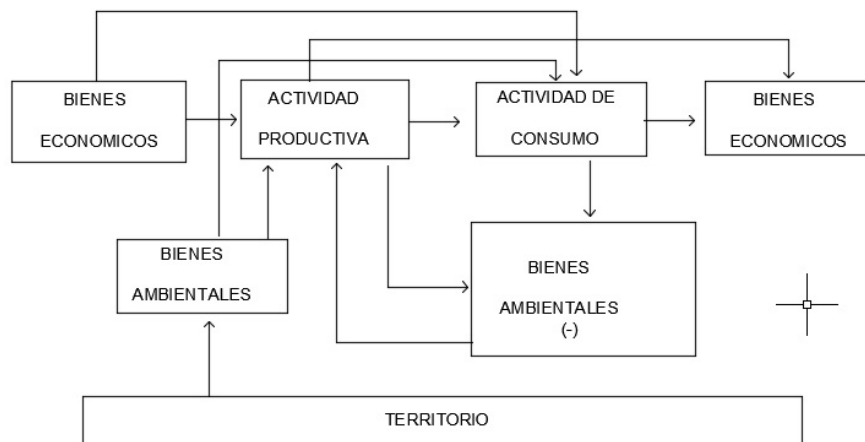


Figura 6. Circulación de materia y energía en el sistema urbano. Elaboración propia.

La producción de alimentos en México está asociada con atrasos sociales, económicos y tecnológicos. Además contribuyen con este problema las limitaciones de carácter organizacional, la falta de asistencia y de capacitación en el trabajo, así

como en las posibilidades de crecimiento y desarrollo del sector alimentario en el marco de la concepción del desarrollo sustentable en el mediano y largo plazo. Los números que describen esta situación son alarmantes y están asociados al avance neoliberal. Por ejemplo, en México, 28 millones de personas carecen de una alimentación plena, y es en el medio rural donde se localiza el 75% de esta población, precisamente donde se efectúan las labores asociadas a la producción de alimentos (Alemán, 2014). No existe una única causa para esta situación, pero algunos factores importantes a considerar son las políticas erróneas y la alteración de los procesos ecológicos. La forma actual de producción de alimentos a gran escala se ha enfocado en abastecer el mercado externo, más que en destinar la producción agrícola al mercado local; como consecuencia, esta forma de industrialización y comercialización de alimentos ha cumplido fines contrarios a los de abastecer de alimentos nutritivos a un mercado de consumo local. Siendo que el factor económico dirige las principales decisiones políticas, la comercialización y exportación de la producción agrícola se prioriza antes que la producción y consumo local, para ser la única forma de desarrollo de producción rural.

Como ya se ha mencionado, la comprensión de los procesos ecológicos que se dan en nuestro entorno debe empezar en nuestras casas, barrios y ciudades, y las tecnologías podrían ayudarnos en esta tarea. El cultivo de los huertos en las áreas urbanas de las familias es un ejemplo que contribuye a entender los ciclos anuales, la fertilidad, la salud, plagas, control, flujo de nutrientes, reciclaje, etc. Además, nos conecta con el costo real de la producción de alimentos y nos sensibiliza con la energía humana y el tiempo invertido en su producción. Es una herramienta que, mientras ayuda a solucionar el problema de la producción de alimentos, contribuye a la comprensión de los procesos naturales y la integración sistémica con nuestro entorno (Yeang, 2001).

Bajo esta misma lógica, los procesos naturales podrían ser contemplados como parte de los sistemas de vivienda. Los arquitectos podrían así contribuir a la integración de la ecología urbana incentivando la creación de hábitats naturales en las ciudades como una parte integral de su propuesta arquitectónica. Esto puede ayudar a satisfacer las necesidades de los seres humanos y equilibrar su entorno, y a su vez, servir para restablecer y resaltar el vínculo con la biodiversidad. Si bien el mantener este vínculo es responsabilidad de todos, los arquitectos pueden contribuir a lograr un mejor ambiente en al menos cuatro distintas formas (Hough, 1998):

1. Lograr que la creación de hábitats naturales sea una parte esencial del planteamiento arquitectónico. Estos hábitats podrían incluir áreas de humedales, lagos lagunas o estanques, áreas de arbolado, techos y muros verdes donde se logre cubiertas vegetales o ajardinadas, así como muros con enredaderas, praderas naturales, etc.
2. Seleccionar los materiales de construcción con una visión ecológica, con el objetivo de priorizar el mantenimiento y preservación de la biodiversidad.

3. Incentivar el contacto con la naturaleza. Esto puede lograrse plantando especies vegetales en el interior y en el exterior de los edificios.
4. Pueden proponer la interacción de tecnologías, buscando sinergias dentro de sistemas que consideran la producción, el consumo y el reciclaje.

La forma en como construyamos y tomemos conciencia para aminorar el impacto en nuestro medio ambiente ayudará a preservar los recursos naturales. De acuerdo con lo que hemos mencionado respecto a los avances tecnológicos recientes, no resulta muy lejano imaginar un futuro en el que se haga más eficiente la forma en que se diseñen los edificios, buscando optimizar su forma y su función adecuándolos para responder a su entorno de una manera tal que se mejoren su eficiencia energética, transmisión de calor, luz y otras variables que atañen a la sustentabilidad. En este nuevo planteamiento para diseñar y construir se posibilita optimizar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, en el que se rescate la estética del entorno, a través de la utilización de materiales y mecanismos acordes a la ecología y la utilización de la tecnología para una interacción más eficaz con nuestro entorno, que satisfaga a su vez las necesidades de energía, alimentos y agua. Se abre así la puerta a una nueva arquitectura que integre materiales y diseños inspirados en la naturaleza.

## **1.7. Acuicultura urbana sustentable**

Desde tiempos antiguos el hombre ha practicado la acuicultura, siendo una práctica milenaria que le ha servido para proveerse de alimentos. En algunas ciudades egipcias, por ejemplo, se han encontrado ruinas de estanques destinados a esta actividad. En la Roma antigua y la Galia los cultivos de ostras prosperaron. En China fueron los cultivos de carpas de los que existen registros de su práctica y cuidado durante el siglo V a. C. Así también, se especula todavía un origen más antiguo en las civilizaciones del medio oriente (Castelló, 1993).

A pesar de lo antiguo de su práctica, la acuicultura todavía no ha sido valorada, pues se puede constatar el poco avance que ha logrado en el transcurso del tiempo en comparación con otras actividades económicas primarias como la ganadería, la agricultura y la pesca. Si bien, la práctica de la ganadería, la pesca y la agricultura le permitieron al hombre extenderse por todo el mundo, se ha comprobado que la explotación de estos recursos ha alcanzado su punto máximo, pues su aprovechamiento intensivo no ha logrado satisfacer los requerimientos alimenticios de la población mundial. En el caso de la pesca, los recursos existentes en el medio ambiente como el mar, ríos, lagos, etc., han alcanzado los volúmenes máximos de producción en muchas pesquerías. De la misma forma, la producción de animales

domésticos y la agricultura no logran satisfacer los requerimientos de alimentos para la población mundial.

Es por esto que en tiempos recientes se ha analizado la posibilidad de incentivar en mayor medida la práctica de la acuicultura como una forma de contribuir a aminorar la problemática de la escasez de alimentos y la devastación ambiental causada por la producción de alimentos. Algunas de las múltiples ventajas de esta práctica productiva son: la alta productividad en el cultivo de algunas especies, su potencial producción como fuente rica en proteínas, su alta eficiencia en la conversión alimenticia. Así, la acuicultura contribuye al bienestar económico, social y nutricional, mientras reduce la presión en la extracción de recursos naturales y su agotamiento por actividades como la agricultura, la pesca y la deforestación, entre otras. Por otra parte, los organismos acuáticos son más eficientes en la conversión alimenticia, pues convierten mejor los alimentos básicos en proteínas de alta calidad, más que cualquier organismo terrestre, por ejemplo, más que las vacas, cerdos o aves.

Se denomina acuicultura al cultivo y cosecha de organismos acuáticos en condiciones controladas y en un medio previamente seleccionado. De acuerdo al tipo de organismos que se cultiven se clasifica en: 1) acuicultura de peces, 2) acuicultura de plantas acuáticas y, 3) acuicultura de invertebrados. Dependiendo lo que se cultive las características y métodos varían por las particularidades biológicas de los organismos que se cultiven. De esta manera, cuando se menciona que la acuicultura se desarrolla en un medio previamente seleccionado y en condiciones controladas se entiende que el medio, en este caso el agua, debe contener los rangos óptimos de los parámetros físico-químicos para que se desarrollen los organismos a cultivar; el hombre interviene en el ciclo de vida y las condiciones de su medio con el fin de producir alimentos. La acuicultura incluye una planeación en el aprovechamiento de recursos, puesto que las personas únicamente cosechan lo que en condiciones controladas han sembrado. Si bien la acuicultura de peces es la más común, los cultivos de algas unicelulares contribuyen en forma importante a la nutrición humana. Una importante cantidad de su producción se destina como alimento de animales terrestres. Sin embargo, existen empresas de acuicultura que reproducen especies de algas unicelulares productoras de proteínas de alta calidad como alimento de lujo para consumo humano. En este sentido, algunas de estas especies, como la *Spirulina*, tienen el potencial para producir grandes cantidades de alimento rico en proteínas y de bajo costo. La posibilidad de realizarlo depende de la generación de aplicaciones científicas, tecnológicas, administrativas y el impulso económico para esta actividad. Se trata de un sector con gran potencial de crecimiento, pero aún en fase de investigación y desarrollo. Un campo de estudio que depende de un sinnúmero de factores que pueden catalogarse en dos grupos: el biológico y el tecnológico.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Organismos unicelulares

La célula es la unidad de la vida, todos los organismos están compuestos por ellas. Todos los seres vivos poseen en común esta estructura microscópica denominada célula, por lo que comprender su estructura y función es esencial para entender cómo funcionan los organismos vivos (Adelberg, Ingraham, & Stainer, 1986).

La teoría celular afirma que:

- Todos los organismos están compuestos de células.
- Las células están vivas y las unidades básicas de la organización están en todos los organismos.
- Todas las células provienen de otras células.

Las células básicamente se encuentran compuestas por una fina membrana plasmática o celular que las rodea, las protege y permite el paso de sustancias desde su interior al exterior, por un citoplasma sobre el que flotan distintas estructuras de moléculas que cumplen y mantienen una función biológica, y un núcleo, el cual contiene el material genético hereditario y posee la información para regular las funciones de la célula (CK-12 Foundation, 2017). Las células surgen de otras precedentes mediante el proceso de crecimiento y división celular.

Las células proporcionan una estructura física para el cuerpo de los seres vivos, toman nutrientes de los alimentos, los convierten en energía, y realizan funciones especializadas, por ejemplo transmitir el material hereditario que les permiten hacer copias de sí mismas. Estas generalizaciones son aplicables a todos los objetos vivos con excepción de los virus. Para comprender la biología de la célula primero hay que conocer las dos categorías en que se dividen: procariotas y eucariotas.

Para entender estas diferencias, es necesario comprender los componentes básicos de la célula, que incluyen:

- Membrana celular
- Núcleo y cromosomas
- Otros orgánulos
- Células procarióticas y eucarióticas

Hay dos tipos básicos de célula y se clasifican según su estructura en: a) células procariotas, que incluyen las bacterias y las arqueas, y, b) células eucariotas, que

incluyen todas las demás células (Janhns, Mann, & Van den Hoek, 1995). Así también, las células eucariotas se dividen según su origen en animales o vegetales.

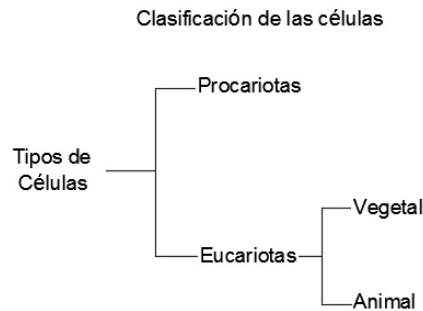


Figura 7. Clasificación de las células según su estructura y origen.  
Adaptado de Adelberg, Ingraham & Stainer (1986).

### Clasificación de los seres vivos

Existen dos grandes grupos de seres vivos: eucariotas y procariotas. El término Eukarion, precede del griego y significa verdadero núcleo, este grupo está conformado por el dominio taxonómico de mayor número de organismos, los eucariontes se dividen en tres reinos: plantas, animales y hongos.

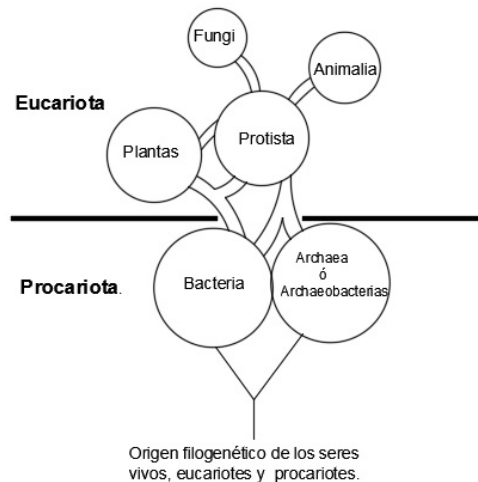


Figura 8. Origen filogenético de los seres vivos.  
Modificado de Janhns, Mann, & Van den Hoek (1995).

Los seres vivos que cuentan con las células más simples que existen son los procariotes o procariontes, estos pueden ser unicelulares y pluricelulares. En las células procariotas, el núcleo celular no se encuentra bordeado por una membrana,

es decir, no se encuentra aislado (Dreckmann, Nuñez, & Sentíes, 2013). En esta clasificación se encuentran las algas verde azules (Cyanophyceae) y las bacterias.

Las células eucariotas contienen el núcleo celular rodeado por una membrana. Las células procariotas pueden considerarse “especializadas”. Estas células forman parte de los tejidos de organismos multicelulares. La diferencia principal entre células procariotas y eucariotas es que éstas almacenan su componente genético, el ADN, en un núcleo cerrado con una membrana, poseen múltiples orgánulos, pequeñas estructuras cerradas como compartimientos con membrana (Clark, Dunlap, Madigan, & Martinko, 2009). En las procariotas, el ADN es un gran círculo que se envuelve en sí mismo, el cual se encuentra en el citoplasma. Las eucariotas pueden ser clasificadas en función de su origen: Célula animal y célula vegetal (Adelberg, Ingraham, & Stainer, 1986). Las células eucariotas incluyen las células de hongos, animales, protistas y plantas. El concepto de microorganismo no define con claridad una categoría taxonómica. Los microorganismos se encuentran distribuidos en una diversidad de grupos taxonómicos, algunos de los cuales cuentan con la presencia de algunas algas que son demasiado grandes para caer dentro de éste término.

Las características unicelulares de algunos organismos no son una diferencia general de los microorganismos, como bacterias, algas y protozoos. Las diferencias de los diversos microorganismos se dan con base a su estructura, tamaño y forma.

Las Cianobacterias, tienen una amplia distribución, se encuentran en una variedad de ambientes: lagos, mares, en el suelo, en el hielo, desiertos, etc. Están presentes desde hace aproximadamente 3500 millones de años (Janhns, Mann, & Van den Hoek, 1995). La *Spirulina* sp es una cianobacteria filamentosa (fig. 9 y tabla 3) que actualmente ha sido descrita dentro del género *Arthrospira*, clasificada como bacteria debido a que su organización celular es procariota. Las especies más utilizadas son *S. platensis* y *S. máxima*, son microorganismos fotosintéticos, característica que les da la presencia de clorofila  $\alpha$ , un pigmento primario, algunas de ellas asimilan nitrógeno atmosférico.

## **2.2. Generalidades de las cianobacterias**

Las algas, con excepción de las verdes-azules, presentan una organización celular de tipo eucariota; es de particular importancia el phylum de las cianobacterias (Cyanophyta = Cianobacteria), las que en conjunto con las Archaeobacteria conforman las procariotas (Janhns, Mann, & Van den Hoek, 1995). Estas algas se

encuentran en una variedad de hábitats con diferentes rangos de parámetros físico-químicos como temperatura, salinidad, ph, oxígeno y nutrientes.

La clasificación de las algas (y en particular las verdes-azules), ha generado algunas controversias debido a su organización biológica y su cercano vínculo con otros conjuntos de organismos como bacterias, plantas, protozoarios y hongos. Las algas presentan características que las identifican y las mantienen unidas como un grupo polifilético (Dreckmann, Nuñez, & Senties, 2013), esto es porque derivan de diferentes grupos o ramas del árbol evolutivo y comparten las siguientes particularidades:

- a) organización celular
- b) estructuras de movimiento
- c) cloroplastos
- d) pigmentos fotosintéticos
- e) pared celular
- f) sustancia de reserva
- g) nutrición
- h) reproducción y ciclo de vida
- i) niveles de organización
- j) hábitats

Los términos algas verde-azules o cianobacterias son considerados similares, el primero describe su correlación biológica y ecológica; mientras el segundo término se refiere a su taxonomía y filogenética. La forma en que está organizada la estructura celular procariota de las cianobacterias se define por dos partes: 1) una pared celular externa, que la rodea y a su vez sostiene y protege a la célula llamada membrana citoplasmática y, 2) un cuerpo central, nombrado nucleoplasma ( Spiller et al., 2001 cit. Rodriguez & Triana, 2017). Las estructuras que conforman las células de las algas son: pared celular, cápsula, cromatoplasma, ribosomas, ADN, nucleoide, cuerpos de inclusión (gránulos de materia orgánica o inorgánica), y un cromatoplasma, el cual esta coloreado por varios pigmentos que forman un sistema fotosintético de tilacoides que posee diferentes pigmentos y que se localizan en el cuerpo central (Ver tabla 1 y fig. 8).

Tabla 1. Composición bioquímica, partes y contenido de biomasa de las microalgas.  
Fuente: (Culebro, <http://studylib.es/doc/7586526/master-en-sostenibilidad-de-la-upc>, 2015).

| <b>Célula de las algas</b> | <b>Núcleo, orgánulos, cloroplastos y clorofila</b>           |
|----------------------------|--|
| Alga preliminar            | Contiene proteínas, carbohidratos, lípido y ácidos nucleicos |
| Biomasa de las algas       | Contiene 40% de ácidos grasos y otros.                       |

En cuanto a su morfología, la *Spirulina* spp está compuesta por una estructura en forma de filamentos, compuestos por tricomas cilíndricos multicelulares, lo que le da su muy particular forma en espiral o hélix; las células pueden estar en arreglos multicelulares para formar colonias con los filamentos, de manera ramificada o no ramificada y, dispuestos de forma uniseriada o multiseriada (Soriano, 2014).

Las células de los filamentos pueden ser células diferenciadas en heterocistos y/o acinetos. Existen algunas de sus especies planctónicas que pueden llegar a flotar debido a la vacuola de gas y muchas de ellas tienen la capacidad de desplazarse por los filamentos (Richmond, Amos, 2006) (ver figuras 9, 9a y 9b).

Las cianobacterias son bacterias verde-azuladas, procariotas, con capacidad fotosintética. Son un grupo de microorganismos fundamentales en la productividad primaria. Las características que distinguen a la *Spirulina* spp son su amplia adaptabilidad y su capacidad para sobrevivir en una gama diversa de entornos, con altos niveles de pH, carbonato y bicarbonato, lo que las hace más tolerantes a ambientes extremos que otras algas, por lo que juegan un papel importante en los procesos biológicos de las aguas superficiales, existiendo en formas libre y fijas. Algunas especies se encuentran en forma simbiótica de plantas y animales. (López, 2011).



Figura 9. Alga *Spirulina* en un sustrato. (Cardenas, Diaz, & Vizcaino, 2017)

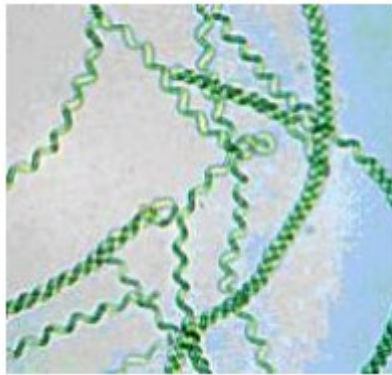


Figura 9a. Vista Microscópica.  
(Cardenas, Diaz, & Vizcaino, 2017)

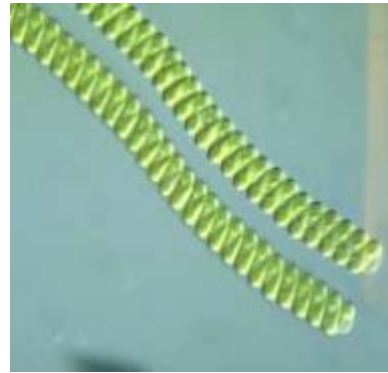


Figura 9b. Detalle Vista Microscópica  
(Cardenas, Diaz, & Vizcaino, 2017)

Para su sobrevivencia, las algas verdes-azules necesitan sustancias inorgánicas como su principal fuente de alimentos, y al tratarse de organismos fotoautótrofos, necesitan luz, además de agua y dióxido de carbono. Estas algas son capaces de desarrollarse empleando materia inorgánica, sin embargo, algunas especies son capaces de sobrevivir a partir de materia orgánica o de carbono como fuente de energía. Crecen en una variedad de entornos con niveles altos de: pH, bicarbonato, carbonato y temperaturas, resistiendo condiciones extremas mejor que otras algas. Transforman los nutrientes de su entorno en proteínas con una alta eficiencia, de esta manera destaca su importancia por su alta eficiencia en la conversión alimenticia a partir de compuestos inorgánicos, de ahí su importancia para ser una fuente de alimento que sirva para nutrir a la población mundial; además de otras ventajas como el suministro de alimento, el cultivo de spirulina está relacionado (y se aplica) en asuntos del medioambiente y de energía como: depuración de aguas residuales, fertilización del agua y el suelo al fijar el nitrógeno del aire, captación del CO<sub>2</sub>, lo que podría reducir el calentamiento global del planeta; además de ser fuentes de compuestos de interés industrial (Cardenas, Diaz, & Vizcaino, 2017).

La estructura de las algas verdes-azules está compuesta por cuatro unidades estructurales denominadas LI, LII, LIII y LIV. La que da una mayor rigidez a su estructura es la capa LI, la cual está compuesta por un polisacárido denominado  $\beta$ -1-2-glucano. También la capa LII contribuye a darle algo de rigidez porque está compuesta de peptidoglicano. Esto puede observarse en la figura 10.

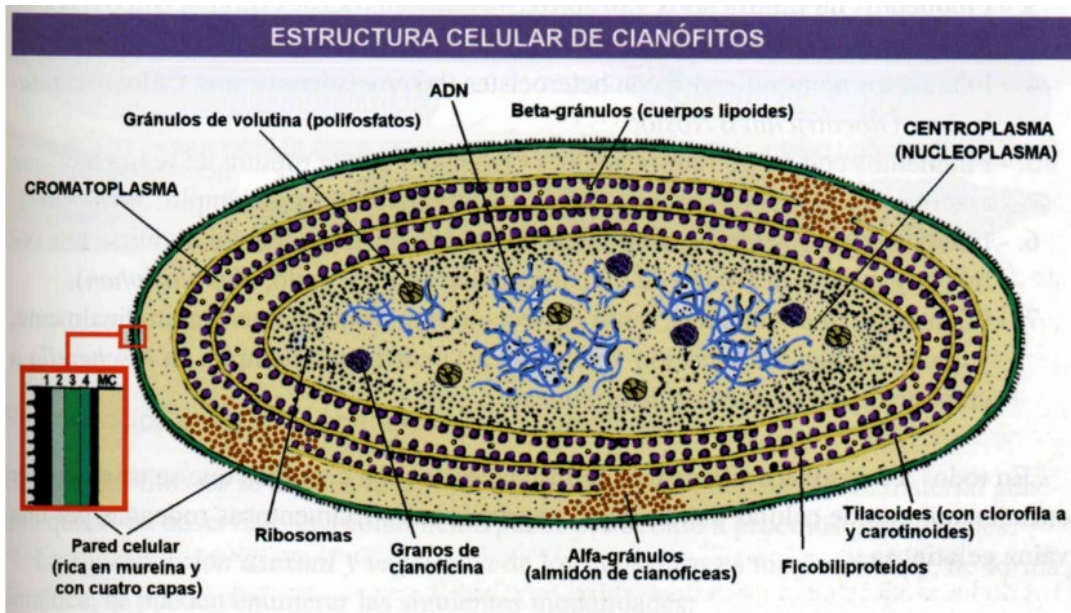


Figura 10. Estructura celular de las cianobacterias, también llamadas algas procariotas.

(<http://umh1156.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/754/2013/02/Tema-2.1.pdf>)

A diferencia de otras microalgas, la presencia de gas en sus vesículas les permiten moverse y en otras cianobacterias con filamentos por medio de microfibras (Rodríguez & Triana, 2017).

Los pigmentos que le dan las características del color a las algas verdes-azules son la clorofila *a*, los carotenos y las ficobilinas, las cuales tienen el pigmento azul (ficocianina). Estos compuestos están en las estructuras de tilacoides, parecidos a los cloroplastos, que se encuentran en los fotosistemas I y II, lo que las hace convertir los nutrientes de su entorno con un alto nivel de eficiencia en proteínas de alto valor nutricional en su proceso fotosintético. Por lo tanto, también se ha explorado su uso como fertilizante para una agricultura más respetuosa con el medio, como es el caso de la empresa Bioalgal Marine, ya que al poder fijar el nitrógeno atmosférico contribuyen a la fertilización del suelo y agua.

El género de la *Spirulina* durante mucho tiempo fue clasificado como una microalga; sin embargo, hoy se le considera una cianobacteria: un *phylum* del dominio de las bacterias (tabla 1) que se desarrolla en aguas alcalinizadas. Su nombre se deriva del latín de la palabra "espiral o hélix", por su forma filamentosa. Se le denomina alga verde-azul por la existencia de clorofila *a* que le proporciona el color verde y la ficocianina que es responsable de darle el color azul (Clark, Dunlap, Madigan, & Martinko, 2009). Las dos especies más importantes son la *Spirulina máxima* y *Spirulina platensis*. En la actualidad hay una confusión entre los términos *Spirulina*,

Spirulina y Arthrospira debido a las distintas épocas en que fue descrita y clasificada inicialmente en el grupo de las algas, por las evidencias que presentaban en un sinnúmero de características que las hacían afines con éstas, sin embargo, en el presente se les considera como bacterias por la forma de organización celular procarionte que presentan. Es por esta reclasificación de su taxonomía por lo que recientemente se le ha renombrado y denominado Arthrospira. En un procarionte su componente genético está almacenado en una sola molécula circular de ADN, ubicado en el citoplasma, sin estar rodeado por una cubierta nuclear que la bordee, presenta en su organización celular ribosomas pero carecen de núcleo, mitocondrias, cloroplastos, retículo endoplasmático, lisosomas y complejo de Golgi.

|         |                                 |
|---------|---------------------------------|
| Dominio | <b>Bacteria</b>                 |
| Phylum  | <b>Cyanobacteria</b>            |
| Clase   | <b>Cyanobacteria</b>            |
| Orden   | <b>Oscillatoriales</b>          |
| Familia | <b>Oscilatoriaceae</b>          |
| Género  | <b>Spirulina</b>                |
| Especie | <b>S. máxima (= Arthrospira</b> |

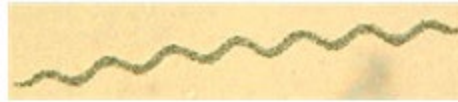
Tabla 2. Ubicación taxonómica de Spirulina (Becker, 1982; cit. (Rodríguez & Triana, 2017)

Su forma es como una estructura de una hélice abierta a todo lo largo de la longitud del filamento, la cual contiene filamentos compuestos de tricomas tubulares multicelulares. Las variables físico-químicas como el pH y temperatura, afectan la forma de la hélice.

El grosor del Tricoma varía de 6 a 12  $\mu\text{m}$ , y está compuesto por células cilíndricas. El diámetro de la hélice varía de 30 a 70  $\mu\text{m}$  y la longitud de una sucesión de tricomas ronda las 500  $\mu\text{m}$ , aunque este varía en cultivos con cierta turbulencia. Lo que hace que se puedan identificar las dos principales especies de cianobacterias (*S. máxima* y *S. platensis*) son la capsula de cada filamento, la irregularidad en los bordes de los filamentos y las vacuolas. Aunque las dos especies poseen células en forma de espiral (tricomas) y una membrana de mucilago externa denominada vaina (Tomaselli, et al., 1996; cit. Rodríguez & Triana, 2017).

Las figuras 11, 12 y 13 muestran este tipo de características. Los factores ambientales influirán en su crecimiento, su tamaño dependerá del enrollamiento celular y de la longitud que puedan alcanzar sus filamentos, pero siempre existirá la forma de hélice en su estructura.

**Filamentos ondulados**



**Filamentos en espiral**



**Filamento recto**



Figura 11. Tipos de filamentos de *Spirulina spp.* (Rodriguez & Triana, 2017)

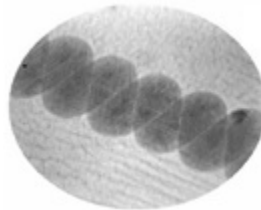


Figura 12. *Spirulina subsalsa*, 2400X, *Spirulina spp.* Visibles rollos apretados de una hélice, 10  $\mu\text{M}$  de espesor total. En una muestra de agua de mar (Spiller, S et al., 2001). Cit. (Rodriguez & Triana, 2017)

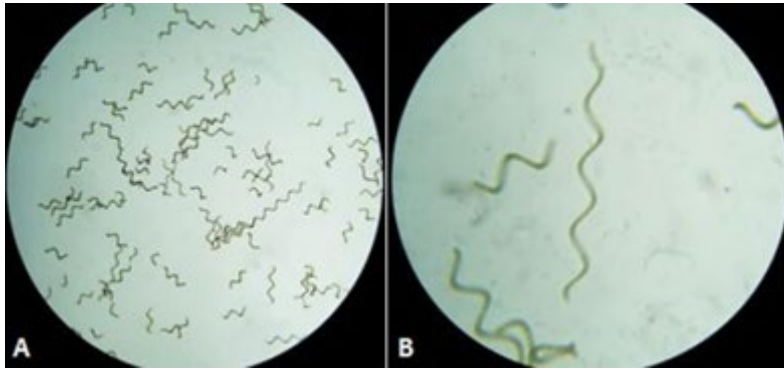


Figura 13. Estructura en forma de hélice fuente de la *Spirulina platensis* A) es en vista microscópica de 10X y B) es en vista microscópica 40X, (López , 2011).

### 2.3. Hábitat, reproducción y ciclo de vida

Las condiciones tan particulares en las que se encuentran en su hábitat hace que las algas verdes-azules se diferencien de las otras cianobacterias, ya que se encuentran en medios muy alcalinos, con abundancia de minerales y en ocasiones con temperaturas elevadas. Estas características del medio no son propicias para que otras especies sobrevivan en esas condiciones.

El desarrollo de *Spirulina* spp. en este tipo ambientes, se debe a:

1. La *Spirulina* spp. es capaz de modificar la alcalinidad de su entorno, al asimilar las sustancias con compuestos de bicarbonatos y carbonatos.
2. La particular forma de crecimiento de su población en el medio acuático hace que reduzca la competencia de su espacio por otras especies, puesto que la densidad con la que se desarrolla en la superficie del agua de su hábitat no permite que otras algas sobrevivan en su medio, al privarlas de luz solar por las características flotantes y pigmentadas que poseen.
3. Un medio de defensa que poseen es secretar moléculas proteicas en su entorno natural.

Fisiología y hábitat de las cianobacterias. La evolución en la Tierra describe tres líneas evolutivas denominados dominios, estos consisten en: Bacteria y Archaea, que pertenecen al grupo de tipo de células llamadas procariotas; y Eukarya, en el que están todos los demás organismos con el otro tipo de células denominadas eucariotas. Dentro del dominio de las bacterias se encuentran las cianobacterias, las cuales constituyen un enorme grupo de bacterias fotoautótrofas. La manera en que crecen las bacterias es por un aumento de la población microbiana, la célula

individual muere, pero el crecimiento continúa porque se conserva el incremento de la población. En el caso de las cianobacterias el crecimiento se da por división celular, las células están dispuestas en filamentos, tienen la propiedad de fragmentarse para formar pequeños segmentos llamados hormogonios, éstos se desprenden de los filamentos para a su vez multiplicarse y formar nuevos filamentos, a este tipo de reproducción de división celular se le conoce como fisión binaria o bipartición. Dos estructuras particulares, filamentos y hormogonios (partes donde empiezan los nuevos organismos), diferencian a las algas verdes-azules de las bacterias, ya que estas no los poseen. Muchas cianobacterias crean cubiertas con mucilagos, estructuras llamadas vainas, las cuales se encargan de agrupar al conjunto de células o de filamentos. En los extremos de los filamentos es más frecuente la división, esta etapa está caracterizada por la segmentación del tricoma, engrandecimiento de las células del hormogonio y la elongación del tricoma. Así, la reproducción de las bacterias se realiza por fisión binaria y por el intercambio de sus componentes genéticos que se da de tres formas: conjugación, transformación y transcripción, sin embargo, la principal forma de modificación genética en las bacterias es la mutación. De esta manera, las células dispuestas en filamentos o en rosarios, tienen la propiedad de reproducirse por bipartición, escisión simple o múltiple, por gemación o por fragmentación (Rodríguez & Triana, 2017).

De acuerdo a su metabolismo, las bacterias se distinguen entre las heterótrofas (saprobiontes, comensales, parásitos) y las autótrofas (quimioautótrofas o quimiosintéticas), y por su ambiente pueden ser aerobias o anaerobias.

Algunas especies producen esporas de resistencia llamadas acinetos (células especializadas) que sirven de protección en épocas críticas de luz, agua y temperatura (congelación), las cuales les permiten resistir condiciones adversas, germinando cuando las condiciones se vuelven óptimas para su sobrevivencia. Esto las convierte en organismos capaces de resistir condiciones desfavorables y de reproducirse con rapidez en condiciones favorables (Clark, Dunlap, Madigan, & Martinko, 2009).

Por consiguiente, las características esenciales de los aspectos biológicos de *Spirulina* sp radica en su ciclo de vida, clasificación taxonómica, fisiología y en el caso de su cultivo sus condiciones ambientales. Los aspectos a considerar para su cultivo y que mayormente inciden en su desarrollo son: pH, intensidad de la luz, presencia de contaminantes, temperatura, iones de bicarbonato, nitrógeno, características del cultivo, biomasa, densidad y la clase del biorreactor (Richmond, 2004). Las cianobacterias (algas verdes-azules), requieren elementos inorgánicos como fuente de alimentación: nitrógeno, oxígeno, carbono, hidrógeno, fósforo y

azufre, los que intervienen en la formación de carbohidratos, grasas y proteínas (Clark, Dunlap, Madigan, & Martinko, 2009).

Estas bacterias se desarrollan en ambientes con altas presencia de sales, por lo que su cultivo es óptimo en lugares cercanos al mar. Además, necesita de aguas alcalinas con pH (iones de potenciales de hidrogeno), de alrededor de 9-11 para su desarrollo. De lo anterior se deduce que el cultivo de Spirulina requiere un cuidadoso control de las condiciones del medio.

## **2.4. Acuacultivos de cianobacterias y microalgas**

La acuicultura es el cultivo de organismos acuáticos bajo condiciones controladas. Su importancia se debe a que es una rica fuente alimenticia para el hombre, sobre todo por la eficiencia en la conversión alimenticia, produciendo proteína de alta calidad. Si bien su cultivo se remonta a tiempos muy antiguos (se practica desde hace milenios); en China se realizaba la « piscicultura de engorde», también encontramos instalaciones acuícolas en Europa en abadías y conventos, (Castelló, 1993), es en las últimas décadas cuando se ha ampliado el conocimiento acerca de la biología de su cultivo, sus aspectos nutricionales y el ambiente en que se desarrolla. Aunque su desarrollo ha estado a la zaga de otras actividades como la agricultura y la ganadería, se pronostica un pronto alcance a estas actividades por el avance tecnológico y el conocimiento de su cultivo, conforme los recursos naturales tiendan cada vez más a agotarse, habrá más incentivos en buscar otras fuentes de suministros alimentarios (FAO, 2017).

La determinación del tipo de sistema de cultivo es difícil, ya que es importante determinar la especie a cultivar con base a las características del cultivo y su valor a partir de su volumen de producción, además de tener en cuentas otros factores como: agua, suelo, etc. (Borowitzka 1999, Martínez 2008). Los factores esenciales a considerar para el desarrollo del cultivo de microalgas son: temperatura, luz, nutrientes, oxígeno, etc. El diseño del cultivo se divide básicamente en dos, abiertos y cerrados, de ahí que también se tomen en cuenta para su diseño: las características biológicas, requerimientos nutricionales, la forma y el tipo del cultivo requerido en la estabulación, desdoble y/o escalado, iluminación, relación entre el área iluminada y el volumen del reactor, lo cual influye en la velocidad del crecimiento, la orientación e inclinación, el sistema de mezclado y difusión de los gases, limpieza, regulación de temperatura, transparencia resistencia del material,

facilidad para el escalado de los organismos y también los costos de su construcción y de operación.

El cultivo de microalgas, y en particular de la cianobacteria Spirulina que suele asociarse con este grupo, puede adquirir un papel primordial; ya que es una tecnología de mediana complejidad, pero con altos beneficios potenciales, por ejemplo: alimentación, eficiencia y producción de energías limpias, preservación ambiental, el tratamiento y reciclado de los materiales de desecho. Es con este avance tecnológico que puede haber un cambio en el modo en cómo nos relacionamos con nuestro entorno. Las microalgas han sido la fuente de alimentación del hombre y también se ha usado como alimento de otros organismos acuáticos en la acuicultura, como el fitoplancton, crustáceos y moluscos. Además han proveído suplementos nutricionales para organismos terrestres. La Spirulina es relevante en esta forma de aprovechamiento en forma nutricional, siendo una de sus propiedades la alta concentración de proteínas, pues contienen hasta un 60% de su peso. Otros usos posibles para la Spirulina son:

- a) Fertilizante. Su uso no ha sido extendido en esta forma de aplicación, a pesar de ser ricas en compuesto nitrogenado y fósforo, lo cual las hace muy accesibles para su utilización en cultivos agrícolas.
- b) Productos Industriales. La gama de sustancias de interés industrial que pueden obtenerse de este cultivo es por su uso químico-farmacéutico y de ahí su interés comercial.
- c) Contaminación. Se ha demostrado el efecto depurador en el tratamiento de las aguas residuales por las características físico-químicas presentes en estas bacterias, en el que las formas de carbono, fósforo y nitrógeno son abundantes y corresponden al hábitat propicio de algunas cianobacterias.
- d) Energía. La biomasa puede ser una fuente de suministro de energía al obtenerse mediante estas bacterias productos como etanol, hidrógeno y biodiesel.

Las características en las que se da la vida en la Tierra están determinadas por tres condiciones básicas: la presencia de un medio líquido (agua), un generador de energía para el metabolismo, y los elementos esenciales con los que están formados los seres vivos: nitrógeno, oxígeno, carbono, fósforo, hidrógeno y azufre.

De esta manera, es útil tomar en cuenta los factores físico-químicos y sus concentraciones para el desarrollo o sobrevivencia del organismo a cultivar, puesto que estas variables influyen en el medio que los rodea y tienen efectos sobre los organismos. El medioambiente está conformado por dos tipos de factores: bióticos

(vivos) y abióticos (no vivos), y la interacción que existe en éstos da lugar a un cambio de materia y energía en los ecosistemas. La manera en cómo influyen los factores ecológicos sobre los organismos vivos no suele ser solamente de forma unidireccional, es decir, siempre va acompañado de una respuesta por el factor biótico, donde de acuerdo a los organismos varía el grado de influencia del factor ambiental que modifica su entorno físico.

Por consiguiente, el cultivo de microalgas requiere para su cuidado considerar factores ambientales como temperatura, nutrientes, oxígeno, luz, etc. Las distintas formas de cultivo de microalgas se engloban en dos grandes grupos: los que se cultivan a cielo abierto y los que están en un medio cerrado. El tipo de cultivo está determinado por las características biológicas del organismo a cultivar y las condiciones del medio. Cuando se trata de cultivos abiertos, aquello que se cultiva está mayormente determinado por los factores medioambientales; mientras que en los cultivos cerrados, denominados fotobiorreactores, no existe o hay poco contacto con el exterior.

#### **2.4.1. Sistemas abiertos de producción**

Los cultivos abiertos pueden estar en estanques naturales o artificiales, ser extensivos o semiextensivos, de flujo rápido (raceway) o como sistemas de capa fina. En los sistemas abiertos se dificulta el mantener una sola especie, al tener mucha exposición a los factores ambientales es muy fácil que se presente contaminación por otros organismos como bacterias u otros. Para lograr mantener la sobrevivencia del cultivo, es importante tener en cuenta las condiciones particulares para su desarrollo y adecuar estas variables para que otras especies no logren sobrevivir, y así evitar la competencia en el cultivo. Las características de la cianobacteria *Spirulina* es que sobrevive a condiciones extremas de salinidad, alcalinidad, temperatura, altas concentraciones de compuestos inorgánicos y crecimiento, ya que al desarrollarse en la capa superficial de la columna de agua forma una capa que no deja pasar luz, condición que muchas especies requieren para su sobrevivencia. Los factores ambientales como la temperatura influyen mucho en el desarrollo de un cultivo abierto, la dificultad que supone en su control y la incidencia en cómo afecta a otras variables como la salinidad, oxígeno disuelto, ph, etc. Además, este tipo de cultivos presentan la dificultad de generar turbulencia, algo de vital importancia para adecuar niveles de densidad, oxigenación, el CO<sub>2</sub> y de mezclado. Por otro lado, presentan la limitante de iluminación en la columna de agua, evaporación y precipitación de sólidos, concentración de sales, etc. (Soriano, 2014).

De acuerdo con Soriano (2014), los factores más relevantes a tener en cuenta en los sistemas de cultivos abiertos son:

- a) Agitación. La generación de turbulencia es utilizada para provocar cierto flujo que ayude a lograr la máxima fotosíntesis del cultivo. En la actualidad, en la mayoría de los cultivos esta turbulencia provocada no es propicia, puesto que no es debidamente controlada y para generarla son empleados mecanismos de hélices, paletas o aire a presión mediante compresores.
- b) Profundidad. Es un factor determinante ya que se relaciona con la capacidad de penetración de la luz.
- c) Revestimiento. Es importante que las paredes y el fondo del estanque sean de superficies lisas para una correcta circulación del flujo de agua, los materiales más usados para este fin son concreto y plástico.

Este tipo de cultivos en sistemas abiertos presentan algunas desventajas, como son la evaporación y la contaminación, tanto por microorganismos como por sustancias. El incremento de temperatura hace que haya evaporación, lo cual provoca que los solutos o sólidos de la mezcla se concentren, aumentando así la salinidad del medio, para contrarrestar esto hay la necesidad de una mayor cantidad de agua, con lo que los costos de energía y agua aumentan por el bombeo que se necesita. Entre las medidas que se han tomado para un mejor control de la evaporación, se ha optado por cubrir los cultivos, con lo cual se reduce la pérdida por evaporación, y se tiene una menor radiación y contaminación; al cubrir los sistemas abiertos se logra un efecto invernadero, lo cual incrementa la temperatura y previene el enfriamiento en las noches o en invierno (Soriano, 2014).

De acuerdo con Dodd (1986) y Oswald (1988) cit. (Soriano, 2014), las formas más comunes de los sistemas abiertos son:

- Estanques circulares. Su sistema de agitación es mediante un brazo rotatorio. Las desventajas de este tipo de sistema es que generalmente son de concreto por lo que su construcción resulta cara, hay un exceso de consumo de energía para la agitación del cultivo y presenta una baja agitación en el centro, por lo que resulta poco práctico y en la actualidad se usan muy poco.
- Sistemas tipo de flujo rápido o "raceway". Son los que más se utilizan, se caracterizan por su forma en vueltas y su disposición ya sea en unidades aisladas o con varias unidades. La agitación suele ser con paletas, compresores o bombas por aire. Son baratos y productivos (figura 13a).

- Piscinas inclinadas. En este tipo de cultivo la agitación es por inyección de aire y gravedad, su diseño es en forma de elipse, con sus extremos constituidos por vueltas. En este último tipo, se trata de crear turbulencia mientras la suspensión de microalgas fluye a través de canales o superficies inclinadas por gravedad; el medio algal es bombeado a la parte superior cuando llega al punto inferior. La velocidad de flujo está dada por la pendiente.

#### **2.4.2. Sistemas cerrados de producción**

Por otro lado, están los sistemas cerrados y semicerrados que consisten en fotobiorreactores tubulares y cilíndricos. Son sistemas económicamente más caros que los abiertos y se utilizan normalmente para el cultivo de cepas especiales para la producción de productos químicos de gran valor. Estos biorreactores pueden ser básicamente:

- Cilíndricos (figura 12c). Una característica importante es que presentan iluminación interior. Pueden contar con control de temperatura, agitación, bombeo de aire con CO<sub>2</sub>. No hay la necesidad de instalarlos en un espacio con controles de iluminación y temperatura, puesto que esto lo ejecuta el biorreactor. Aunque existen cultivos que tienen implementada la automatización en su proceso por medio de una computadora, es común que se suministre el aire por la parte inferior en forma de burbujas. El tamaño del diámetro no debe rebasar los 2 metros por razones de iluminación, y su altura está limitada a un rango de los 4 metros por cuestiones propias de la estructura.
- Tubulares (figura 12d). Se conforma por series de tubos verticales, horizontales, inclinados o helicoidales. El cultivo de microalga es agitado para su recirculación por medio de aireadores. El tamaño del diámetro de los tubos generalmente no rebasa el metro de longitud y su largo puede ser de cientos de metros. Una de las desventajas de este tipo de fotobiorreactores es que presentan caídas de CO<sub>2</sub> e incremento de O<sub>2</sub>, lo cual influye en las características del medio de cultivo afectando así el rendimiento y composición química de los organismos, además de un gran gasto en energía. La relación área/volumen mayor a 1m<sup>-1</sup> es una de las principales ventajas que posee este diseño de fotobiorreactor. Es importante el material de construcción ya que presentan ventajas en climas templados y desventajas en climas cálidos, al incrementarse su temperatura de 10 a 15 °C con respecto a la temperatura ambiente, lo que conlleva a tomar medidas para controlar este efecto. Su principal desventaja es el alto consumo de energía (Soriano, 2014).



Figura 13. Configuraciones de fotobiorreactores (a.raceway, b.placas planas, c.cilíndricos, d.tubulares horizontales) (Soriano, 2014)

## 2.5. Composición química y potencial de alimentación

Al pertenecer al *phylum* de las cianobacterias, la *Spirulina* spp (*Arthrospira*), es un microorganismo con un gran interés por su alto valor nutricional, sus constituyentes son totalmente asimilables sin necesidad de cocción ni de cualquier otra forma de tratamiento y la característica de su pared celular favorece su digestión. (Becker, 1982) cit. (Rodríguez & Triana, 2017).

La *Spirulina* contiene un 60-70% de su peso en proteína vegetal de alta calidad. Su importante valor nutricional se debe a este alto contenido y por la presencia de una clase especial de lípido (GLA). Los constituyentes de esta cianobacteria también incluyen un alto contenido de vitaminas como las provitaminas-A (principalmente  $\beta$  caroteno), vitaminas C y E, minerales (magnesio, calcio, hierro, cromo, cobre, manganeso, fósforo, potasio, zinc y sodio), aminoácidos, enzimas, carbohidratos, lípidos, carotenos, clorofila, ficocianina, etc. (Hall, 2006; Cárdenas, Díaz, & Vizcaíno, 2017).

La *Spirulina* tiene el enorme potencial de ser una fuente de alimentos que contribuya a alimentar y nutrir a la población mundial.

### 2.5.1. Proteínas

Las proteínas de *Spirulina* spp. poseen todos los aminoácidos primordiales que el ser humano necesita en su dieta diaria. La alta cantidad de aminoácidos sugiere la gran concentración de proteínas en alrededor de 60%, y para lograr la cantidad óptima sería necesario complementar la alimentación con cereales que aportarían aminoácidos azufrados, lisina y/o histidina. La tabla 3 muestra la concentración de *Spirulina* en comparación con otras fuentes de proteínas de alimentos de consumo cotidiano; como resultado se tiene una relevancia alimentaria por su alto valor nutricional y su fácil absorción y asimilación, y por la característica de su membrana que no contiene celulosa sino mureína, la digestibilidad de sus proteínas es óptima, pues alcanza valores del rango de 80-90% (Becker, 1982; Cit. Rodríguez & Triana, 2017).

La concentración de proteínas está en alrededor del 60% de su peso seco. Esta concentración es extraordinaria ya que las mejores fuentes de proteínas en vegetales difícilmente alcanzan la mitad de esta medida (Hall, 2006; Cárdenas, Díaz, & Vizcaíno, 2017). La tabla 3 contiene el aporte de proteínas y aminoácidos de la *spirulina*.

| <b>Tipo de Alimento</b>  | <b>(%) Proteína</b> |
|--------------------------|---------------------|
| Spirulina spp            | 45                  |
| Huevo entero             | 47                  |
| Levadura de<br>cerveza   | 37                  |
| Soya entera en<br>harina | 34                  |
| Queso tipo<br>parmesano  | 34                  |
| Germen de trigo          | 27                  |
| Maní                     | 26                  |
| Pollo                    | 24                  |
| Pescado                  | 22                  |
| Carnes de res            | 22                  |

Tabla 3. Contenido proteico de diferentes alimentos (Sánchez, 2003/b) (Rodríguez & Triana, 2017)

Tabla 4: Contenido de aminoácidos en la Spirulina

| Contenido de aminoácidos en la Spirulina |               |
|--|---------------|
| Compuesto                                | Contenido (%) |
| Proteína                                 | 50-70         |
| Aminoácidos esenciales                   |               |
| leucina                                  | 5.9 - 6.5     |
| Valina                                   | 7.5           |
| Isoleucina                               | 6.8           |
| Lisina                                   | 2.6 – 3.3     |
| Fenilalanina                             | 2.6 – 3.3     |
| Metionina                                | 1.3 – 2.3     |
| Triptófano                               | 1.0 – 1.6     |
| Aminoácidos no esenciales                |               |
| Ácido glutámico                          | 7.3 – 9.5     |
| Ácido aspártico                          | 5.2 – 6.0     |
| Cisteína                                 | 0.5 – 0.7     |

Fuente: Modificado de Cohen (1997), Sasson y Sanchez *et al* (2003), Cit. (Cardenas, Díaz, & Vizcaino, 2017)

### 2.5.2. Carbohidratos.

La Spirulina contiene altas concentraciones de carbohidratos de polisacáridos como la glucosa, galactosa y xilosa, los polímeros de glucosa se encuentran en alrededor del 20% del peso seco. En la tabla 5 se muestra el contenido de carbohidratos en la Spirulina spp. Los azúcares simples como la glucosa, fructosa y sacarosa están presentes en cantidades muy pequeñas, mientras que los polisacáridos intervienen en la reparación del ADN.

| Contenido de carbohidratos y pigmentos |               |
|--|---------------|
| Compuestos                             | Contenido (%) |
| Carbohidratos                          | 15-20         |
| Glicerol                               | 7.4           |
| Glucosa                                | 7.5           |
| Ramnosa                                | 17.1          |
| Fucosa                                 | 3.3           |
| Ribosa                                 | 8.1           |
| Xilosa                                 | 4.5           |
| Manosa                                 | 1.9           |
| Galactosa                              | 8.2           |
| D-Glucosamina                          | 2.12          |
| No identificados                       | 2.6           |
| Pigmentos                              | 6             |
| Clorofila                              | 0.8-1.5       |
| Caretenoides                           | .648          |
| B-caroteno                             | 15            |
| Equinenona                             | 11-13         |
| b-critoxantina                         | 6-8           |
| 3'-hidroxiequinona                     | 7-11          |
| Zeaxantina                             | 25            |
| Diatoxantina                           | 5             |
| Cantaxina                              | 5             |
| Mixoxantofila                          | 11-17         |
| Oscillaxantina                         | 3-5           |
| No identificados                       | 3-4           |
| Ficocianina                            | 16-20         |

Fuente: Modificado de Cohen (1997), Sasson y Sanchez *et al* (2003), Cit. (Cardenas, Diaz, & Vizcaino, 2017)

Tabla 5. Contenido de Carbohidratos y Pigmentos.

### 2.5.3. Lípidos

La concentración de lípidos que tiene la Spirulina es de alrededor del 9% de su peso en seco, aunque algunos expertos calculan hasta un 13%, la mitad de ellos ácidos grasos que otras formas de lípidos no contienen. En los primeros se encuentra: Monogalactosildiacilglicerol, fosfadilglicerol (PG), sulfoquinovosil; diacilglicerol y en los segundos se encuentra principalmente el ácido linoleico (GLA). Estos lípidos totales pueden ser obtenidos por saponificación: 83% en la fracción saponificable y 17% en la insaponificable. Es decir, de todos los lípidos una mayor parte se encuentran en la parte que se puede hidrolizar en una solución alcalina. “La fracción saponificable está compuesta principalmente por 23 % de monogalactosil y de

digalactosil diglicéridos, 5 % de sulfoquinovosil diglicérido y 25 % de fosfatidilglicerol. Los triglicéridos son escasos (0.3%). Se detecta además 4 % de fosfolípidos no definidos”. (Tiboni, 1985; cit. Rodríguez & Triana, 2017).

Los ácidos grasos son importantes para el ser humano, las concentraciones que requiere un adulto es de 1-2% y un 3% para un niño. Se ha determinado que benefician al sistema inmune. “De los ácidos grasos presentes, los que se encuentran en mayor proporción son los ácidos: palmítico, g-linoleico (GLA), linoleico y oleico, pero el que más importancia tiene es el GLA, un ácido graso insaturado esencial que rara vez está presente en la dieta diaria. Entre las fuentes que contienen GLA, la Spirulina sp. es la que lo contiene en mayor concentración”. (Roxana y Ramírez, 2006; cit. Cardenas, Diaz, & Vizcaino, 2017). La tabla 6 contiene las cantidades de lípidos presentes en la Spirulina.

| Contenido de lípidos    |               |
|-------------------------|---------------|
| Lípidos                 | Contenido (%) |
| Ácidos grasos           | 3-6.5         |
| Ácido mirístico         | 0.23          |
| Ácido palmítico         | 44.6-54.1     |
| Ácido palmitoleico      | 1.26          |
| Acido g-linoleico (GLA) | 8-32          |
| Ácido linoleíco         | 11-31         |
| Ácido oleico            | 1-15          |
| Otros                   | 20.88         |

Fuente: Modificado de Cohen (1997), Sasson y Sanchez *et al* (2003), Cit. (Cardenas, Diaz, & Vizcaino, 2017)

Tabla 6. Contenido de lípidos.

### 2.5.3.1. Ácidos grasos (lípidos saponificables)

Los ácidos grasos esenciales se clasifican en dos grupos: saturados e insaturados, (n3 y n6) lo cual indica la ubicación de saturación más cerca al grupo metilo terminal, siendo los saturados los saponificables. Esta clase de lípidos juegan un papel importante en aspectos de inmunidad humoral en la función de anticuerpos específicos, de igual manera en la actividad de inmunidad celular (Rodríguez & Triana, 2017). La concentración de ácidos en la Spirulina spp es considerada como de importancia por su elevado contenido, presente además en la leche y algunos aceites vegetales.

### **2.5.3.2. Lípidos insaponificables**

Los lípidos insaponificables son aquellos que no poseen en su estructura ácidos grasos. Entre estos están los terpenos, los esteroides, y las prostaglandinas. El esteroide más común entre humanos y animales es el colesterol y aunque algunas fuentes denotan la ausencia de esteroides; algunos estudios indican la presencia de estos en alrededor de 1.5% en S. máxima en la fracción no polar (Rodríguez & Triana, 2017).

Está demostrado que la clase de colesterol que posee la Spirulina es benéfico para la salud, de esta manera, el consumo de la Spirulina contribuye a disminuir el colesterol total, lo que impide el incremento de triglicéridos y el riesgo de enfermedades cardiovasculares; elimina la acumulación de grasa en el hígado estimulando su recuperación, debido a la elevada concentración de clorofila, ácidos grasos poliinsaturados, ácido nicotínico, aminoácidos esenciales y fibra. Es por esto que se propone el consumo de Spirulina como una alternativa que además de ser una importante fuente de suministro de proteínas, tenga otros beneficios en la salud, como la disminución de colesterol e hipertensión y la reducción del riesgo de enfermedades cardiovasculares, entre otros.

### **2.5.4. Vitaminas**

Las innumerables investigaciones que se ha dado en torno a la Spirulina y sus múltiples beneficios han arrojado datos sobre esta cianobacteria como uno de los alimentos naturales con mayores concentraciones de muchas sustancias, conteniendo vitamina B12, betacaroteno, elevadas concentraciones de provitamina A, vitamina E, calcio, fósforo, hierro, manganeso, cobre, ácido gamma-linoleico, etc. Es por esto, que se recomienda su uso para combatir la anemia (ver tabla 7).

| Contenido de vitaminas en la spirulina |              |
|--|--------------|
| Vitaminas                              | Contenido(%) |
| Provitamina A                          | 0.11-0.2     |
| Tiamina B1                             | 3-4mg        |
| Riboflavina B12                        | 2.5-3.5 mg   |
| Niacina B3                             | 0.014 mg     |
| Cobalamina B12                         | 0.15-0.25 mg |
| Vitamina E                             | 5-7 mg       |
| Vitamina K                             | 2.2 mg       |
| Ácido fólico                           | 4-5 mg       |
| Ácido pantoténico                      | 0.5-0.8      |
| Biotina B7                             | 5 µg         |

Fuente: Modificado de Cohen (1997), Sasson y Sanchez *et al* (2003), Cit. (Cardenas, Diaz, & Vizcaino, 2017)  
 Tabla 7. Contenido de vitaminas.

Por su abundancia en vitamina E, la Spirulina ayuda a combatir el envejecimiento celular por la disminución de la oxidación de los ácidos grasos del cuerpo, combatiendo la formación de radicales libres. La cianobacteria es una agente de antioxidación de la piel, protege la vista, mucosas y aumenta la resistencia a infecciones.

#### 2.5.4.1. Vitamina A

Los caretenoides están conformados mayormente por beta-caroteno (80%) en la Spirulina spp; la parte restante contiene primordialmente de ficoxantina y de criptoxantina (Belay, 2002: cit. Rodriguez & Triana, 2017). Encontrándose concentraciones de 700 a 1700 mg. de  $\beta$ -caroteno y en alrededor de 100 mg de criptoxantina y ficoxantina por cada mil gramos de material seco de ésta microalga (tabla 7); ambos carotenoides son transformados por los mamíferos en vitamina A. En La tabla 7 se desglosan los volúmenes de pro-vitamina A y betacarotenos hallados en Spirulina spp, además de otras vitaminas esenciales (Sánchez, 2003/a).

#### 2.5.5. Minerales

Las altas concentraciones de minerales dan una visión de la importancia que puede representar el consumo de Spirulina spp. Los minerales que la constituyen son hierro, magnesio, calcio, fósforo y potasio. La tabla 8 muestra la composición total de minerales de Spirulina spp. Es de resaltarse la fácil asimilación de hierro en la spirulina en comparación con otras fuentes de suplementos nutricionales que contienen sulfato de hierro.

La presencia de calcio, fósforo y magnesio en esta alga se encuentra en concentraciones similares a las que están presentes en la leche. El aporte de estos elementos y su biodisponibilidad están equilibradas, lo que evita una posible descalcificación por exceso de fósforo.

| <b>Mineral</b> | <b>mg 100g<sup>-1</sup></b> |
|----------------|-----------------------------|
| Calcio         | 700                         |
| Cromo          | 0.28                        |
| Cobre          | 1.2                         |
| Hierro         | 100                         |
| Magnesio       | 400                         |
| Manganeso      | 5.0                         |
| Fósforo        | 800                         |
| Potasio        | 1400                        |
| Sodio          | 900                         |
| Zinc           | 3.0                         |

Tabla 8. Contenido de minerales en Spirulina spp. (Belay, 2002). Cit. (Rodríguez & Triana, 2017).

### **2.5.6. Ácidos Nucléicos**

Los ácidos nucleicos (ADN y ARN) presentes en la spirulina son del orden 4.2 a 6%, lo cual es considerado como una concentración alta en términos nutricionales. Estas concentraciones conllevan la degradación bioquímica de algunos de sus elementos, lo cual puede llevar a un aumento en el ácido úrico, por lo que el consumo excesivo de Spirulina podría tener como consecuencias afecciones renales (Tiboni, 1985; cit. Rodríguez & Triana, 2017). La dosis establecida de consumo diario para una persona adulta es de 4 grs. aproximadamente, aunque esto depende de múltiples factores como la edad, sexo, sobrepeso, etc.

### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

Se realizó una revisión de literatura de las condiciones de cultivo de la Spirulina y los sistemas de producción acuícola de ésta, posteriormente, se profundizó en las técnicas más relevantes acerca de los medios de producción cerrados, mediante los principios de fotobioreactores para implementar e identificar los mecanismos y/o procesos de su cultivo y cosecha de las distintas variables fisicoquímicas, que influyen en su desarrollo de producción bajo condiciones controladas y, de este modo llevar a cabo la instrumentación por medio de control automático del sensado de las variables antes mencionadas; una vez identificadas las variables así como los sensores y demás instrumentos mecánicos y electrónicos necesarios para su automatización, se diseñó una estrategia de control para empatar las necesidades biológicas y la teoría de control necesaria para la aplicación en el prototipo a diseñar. Es de hacer mención que la teoría de control parte de básicamente de dos formas: uno es a través de un medio de lazo cerrado y el otro es abierto; para esta propuesta, el diseño se basó del concepto de lazo cerrado, en el que hay un mecanismo de retroalimentación para las distintas variables a controlar, luego se programó su control automático con hardware abierto y luego se implementaron en un prototipo a través del diseño de un sistema de cultivo de Spirulina automatizado, que pueda apropiarse socialmente, contribuirá a solucionar la falta de soberanía alimentaria, la desnutrición y las externalidades asociadas a la producción de alimentos.

#### **3.1. Definición del problema a abordar. Fundamentos biológicos y de control para el diseño del prototipo**

##### **3.1.1. Cinética de crecimiento**

El crecimiento de Spirulina spp. en un cultivo por lotes es la base que tomamos para la implementación de las variables. La cinética de crecimiento se desarrolla bajo condiciones preestablecidas por cada investigador o productor, considerando las

fases de desarrollo que describe Becker (1982), cit. (Rodríguez & Triana, 2017) de la siguiente manera:

1. Fase de adaptación
2. Fase de crecimiento exponencial
3. Fase de crecimiento lineal
4. Fase estacionaria
5. Fase de muerte.

En la primera etapa, fase de adaptación, como su nombre lo indica, la *Spirulina* en el cultivo se aclimata, siendo su velocidad de crecimiento muy baja mientras se adecua con el tiempo a las condiciones, aumentando lentamente su tasa de crecimiento con el transcurrir del tiempo y la capacidad de adaptación. En la fase exponencial, la luz no es una condicionante, puesto que una vez aclimatada a las circunstancias del crecimiento, seguirá un aumento en la biomasa del cultivo. En un medio sin limitantes de nutrientes y de luz, el crecimiento estará dado en forma exponencial, la cantidad y/o volumen del cultivo, el incremento de la biomasa inicial (denominada como número de células, peso seco, etc.) por unidad de tiempo, aumentara proporcionalmente, dando como resultado un crecimiento exponencial. (Becker, 1982)

En la tercera fase, la *Spirulina* spp. seguirá creciendo y el aumento de células, dada la densidad provocara una reducción de luz en el cultivo. El crecimiento por organismo se reduce mientras que la densidad aumenta de forma lineal. Este incremento en la densidad continuara hasta que aminoren los nutrientes, habiendo en esta etapa una interferencia por la respiración de las células y por lo tanto una inhibición en el crecimiento de la biomasa.

En la fase estacionaria (La cuarta etapa). Es caracterizada por una reducción en la velocidad de crecimiento, las concentraciones de luz disminuye y la respiración se incrementa. La oxidación metabólica de los compuestos del medio de cultivo disminuye la densidad de la biomasa. Es aquí que se logra el valor máximo de concentración, se establece un equilibrio la mayor cantidad de biomasa y la disminución por la asimilación metabólica.

En la última fase, la quinta, (fase de muerte). Está determinada por los procesos de descomposición, en el que las células mueren, y se libera materia orgánica, es ocasionado por los desajustes de los factores fisicoquímicos en las condiciones del cultivo: luz, oxígeno, Ph, nutrientes, contaminantes, etc.

El cálculo de la densidad para el conteo de las células, es determinada por espectrofotometría, el método que más se utiliza para realizar una estimación de su concentración. “La exactitud de esta metodología es alta y confiable, siempre y cuando se tenga en cuenta elementos como: tamaño celular, forma, y presencia de precipitados. La lectura para cultivos de *Spirulina* spp. se lleva a cabo a una longitud de onda de 560 nm.” (Becker, 1982; cit. Rodríguez & Triana, 2017).

### **3.1.2. Definición de variables**

En general se acepta que son ocho las variables principales que determinan la productividad del cultivo de *Spirulina* spp.: temperatura, luminosidad, tamaño de inóculo, velocidad de agitación, sólidos disueltos, pH, calidad de agua, y la presencia de macro y micronutrientes (Ciferri, 1983; Ayala, 1982). La implementación se limitará a controlar las más importantes: temperatura, luminosidad, velocidad de agitación, sólidos disueltos y PH. A continuación, se describen las variables y después se detallan las variables con su estrategia de control.

#### **3.1.2.1. Temperatura**

La temperatura del medio de cultivo es un factor determinante en la tasa de crecimiento de la *Spirulina* spp. La velocidad óptima de crecimiento oscila en un rango entre los 35 – 38 ° C. Las variaciones demasiadas altas afectan la velocidad de la productividad primaria. Se recomienda tener en cuenta dos tipos de temperatura, la del mediodiambiente y la del cultivo.

#### **3.1.2.2. Iluminación**

La intensidad de la iluminación es uno de los parámetros importantes a tener en cuenta en el cultivo, ya que la productividad primaria se define como el proceso mediante el cual las sales inorgánicas se transforman en biomasa (material vivo), siendo realizada por organismos autótrofos que sintetizan estos elementos por medio de la fotosíntesis. Aunque si bien son organismos autótrofos, la *Spirulina* spp no tolera exposiciones duraderas de luz, ya que demasiada luz provocaría el rompimiento de la pared celular por fotólisis. Es por esto, que se recomiendan fotoperiodos de 12hrs. por 12hrs. (día/noche), en estos lapsos de tiempo se llevan a cabo la asimilación de CO<sub>2</sub> en el día, y en la noche reacciones de síntesis de proteínas. . La cantidad de iluminación en cultivos de laboratorio esta en un rango

de 2000 y 5000 luxes, según la concentración de biomasa. (Vonshak, 1984, Gitelson, 1996; cit. Rodríguez & Triana, 2017).

### **3.1.2.3. Agitación**

La turbulencia en el cultivo de *Spirulina* spp., es provocada para lograr una diseminación uniforme de la biomasa en el medio acuoso y también para alcanzar una mayor exposición de iluminación de sus filamentos. Una turbulencia demasiado brusca afecta las células del cultivo lo cual ocasiona la generación de espuma, impidiendo el paso de la luz y la disolución de gases. a través de agregar aire enriquecido con CO<sub>2</sub> por medio de bombas. Con lo cual se busca la asimilación de carbono necesario para las reacciones metabólicas y dispersar la acumulación de la biomasa del cultivo. “Una agitación muy brusca puede estropear la *Spirulina* spp. provocando la aparición de espuma, que obstaculiza la penetración de la luz y el intercambio gaseoso del cultivo. Ciertas bombas centrifugas y cascadas de agua que salpican, son especialmente nefastas. En caso de cultivos pequeños (menos de 10 litros), la agitación puede realizarse a través de una inyección de aire con un compresor de acuario y/o ser complementada con la adición de CO<sub>2</sub>. Con este último se puede lograr un doble objetivo: proporcionar agitación y enriquecer el cultivo con más carbono disponible para el metabolismo celular.” (González, 1995, Morales, 2002; cit. Rodríguez & Triana, 2017).

### **3.1.2.4. Nutrición**

Los aspectos de alimentación, crecimiento y metabolismo están basadas en la asimilación de nutrientes, el crecimiento depende las relaciones metabólicas. Las características de éstos organismos es que sintetizan glucosa a partir de dióxido de carbono y agua por medio de la captación de energía lumínica y realizando así la fotosíntesis. Es por medio de la fijación de carbono que se mide la productividad primaria; el dióxido de carbono esta presente en todas sus formas como: CO<sub>2</sub> disuelto, bicarbonato y carbonato. Algunos gases al disolverse en el agua ocasionan reacciones que incrementan la concentración de sales. El principal suministro de carbono es el bicarbonato (HCO<sup>-</sup>) ; la concentración de sales esta en un rango de 20 y 90 g L<sup>-1</sup>. La presencia de algunos aniones y cationes como: (CO<sub>3</sub>)<sup>-2</sup>, (Cl)<sup>-1</sup> , (NO<sub>3</sub>)<sup>-1</sup>, (PO<sub>4</sub>)<sup>-3</sup>, (SO<sub>4</sub>)<sup>-2</sup>, (Cl)<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Ca<sup>+2</sup>, son indispensables para las reacciones metabólicas. La proporción de la concentración de estos iones influyen en la asimilación de los nutrientes como la relación Na:K que esta en un

rango de 10:1 y 5:1 (Nascimento, 1990; cit. Rodríguez & Triana, 2017 ). Las concentraciones de otros micronutrientes son necesarios para los procesos fisiológicos y reacciones enzimáticas. Los medios preferidos de cultivo para la Spirulina son: Zarrouk y SSM (el Medio Salino de Mar) (Gitelson, 1996) cit. (Rodríguez & Triana, 2017). Siendo el medio Zarrouk mas empleado en el proceso de aislamiento, y el medio de SSM el predilecto para la fase de industrialización.

La tabla 7 presenta la composición del medio Zarrouk.

| Sustancia  | Concentración (g/L) |
|--|---------------------|
| NaHCO <sub>3</sub>   | 13.61               |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>  | 1.03                |
| K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>  | 0.50                |
| NaNO <sub>3</sub>  | 2.50                |
| KSO <sub>4</sub>   | 1.00                |
| NaCl   | 0.20                |
| MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O  | 0.04                |
| CaCl <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O  | 0.01                |
| FeSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O  | 0.05                |
| H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>   | 2.86                |
| MnCl <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O  | 1.81                |
| ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O  | 0.22                |
| NaMoO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O   | 0.39                |
| CuSO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O  | 0.079               |
| Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6 H <sub>2</sub> O                             | 0.049               |
| VO <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O                                | 49.6mg              |
| K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O | 96.0mg              |
| Ni SO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O   | 47.8mg              |
| Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O                                | 17.9mg              |
| TiOSO <sub>4</sub>   | 33.3mg              |
| Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6 H <sub>2</sub> O                             | 44.0mg              |

Tabla 9. Medio de cultivo Zarrouk (Zarrouk, 1966) cit. (Correa & Torres, 2008).

### 3.1.2.5. pH

El pH es un factor determinante para el desarrollo del cultivo de Spirulina. El pH esta en función de varios parámetros como la productividad, la alcalinidad, la actividad metabólica, la temperatura, la acción microbiana y la eficacia del suministro de CO<sub>2</sub>. La alcalinidad aumenta por la asimilación del carbono presente en el cultivo, pudiendo cuantificarse la biomasa por la concentración de pH, “a mayor biomasa, mayor degradación de bicarbonato y por consiguiente se eleva la concentración de grupos hidroxilos en el medio, aumentándose así el pH (Pelizer, 2000; Rodríguez & Triana, 2017). La solubilidad de CO<sub>2</sub> esta en función

del pH lo que influye en el crecimiento de *Spirulina* spp. El rango de pH óptimo de este microorganismo esta entre 8 – 11. Y en los cultivos industrializados esta arriba del 9.4, porque así se evita la contaminación y competencia por otros organismos (Berry, 2003; cit. Rodriguez & Triana, 2017).

### **3.1.2.6. CO<sub>2</sub>**

El suministro de CO<sub>2</sub> regula el pH, sirviendo como indicador ya que si la fuente de carbono es muy baja éste se incrementa. Lo que se busca con la presencia de este gas es acelerar la asimilación de carbono. En un rango de pH 10.5 comienza la retención del CO<sub>2</sub> en el medio líquido de cultivo. En resumen, la importancia de este gas es porque disminuye la alcalinidad y amortigua el pH (De Alva, 1997; cit. Rodriguez & Triana, 2017). Es recomendable que la concentración de CO<sub>2</sub> en el medio de cultivo de *Spirulina* spp. este en un rango de 0.05 – 5% (v/v), y que sea inyectado al medio en forma de burbujas y adicionado con aire.

### **3.1.3. Control digital de las variables**

El primer paso para el diseño de controladores digitales, como el que se busca desarrollar en este trabajo de obtención de grado para el cultivo de *Spirulina*, pasa por el diseño del correspondiente controlador continuo. Después, es necesario buscar el equivalente digital que proporcione la salida del sistema en lazo cerrado; es decir, los dispositivos que se encargarán de dirigir, administrar, ordenar o regular el comportamiento. Así, una vez realizado el ajuste del controlador se sustituye el elemento de control analógico por el conjunto ADC (convertidor análogo-digital), controlador digital, DAC (convertidor digital-análogo), como se indica en la Figura 13. De esta forma, se comienza por plantear un modelo discreto; es decir, el modelo en el que las variables de estado cambian de forma continua con el paso del tiempo. Partiendo de ese correcto modelo discreto, se diseña el controlador digital que proporciona la salida deseada de la planta en los instantes de muestreo. La figura 14 ilustra este proceso. En primer lugar, se proporciona un objetivo al sistema de control. Este a su vez genera una entrada al sistema que se busca controlar y responde a las perturbaciones, buscando generar la salida deseada (Rodríguez Sánchez, 1999).

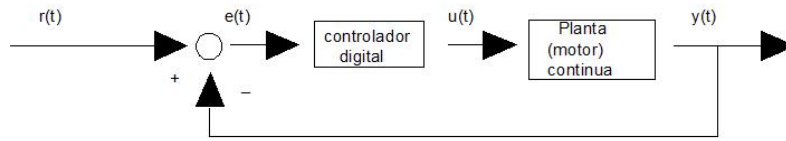


Figura 1.1 Sistema Típico de control control analógico

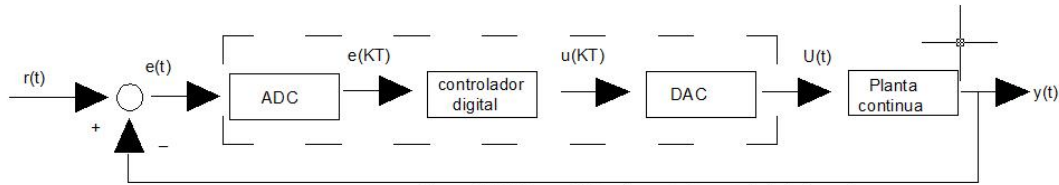


Figura 1.2 Sistema Típico de control control digital, con los componentes elementos de interfaz analógico digital y viceversa

Figura 14. Sistema típico de Control Digital. Adaptado de (Ogata, 1996) .

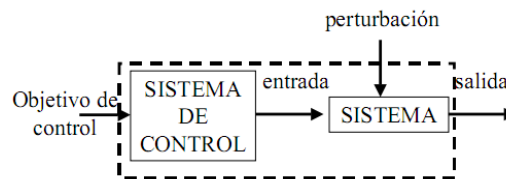


Figura 15. Sistema de Control. Adaptado de: (Biel, Gomariz, Matas, & Reyes, 1999)

Los dispositivos digitales en tareas de control abarcan dos tipos de aplicaciones:

- 1) Control de sistemas muestreados, donde cada lazo de realimentación está sincronizado por un periodo de reloj.
- 2) Control por eventos, donde la actuación depende de la ocurrencia de ciertas condiciones en las entradas o del cambio experimentado por los estados internos del controlador.

El corazón de un sistema de control digital es un procesador digital. Este cuenta con elementos hardware analógicos en su periferia para establecer el interfaz con el sistema.

Los sistemas de control —conjunto de dispositivos que actúan juntos para lograr un objetivo de control— pueden definirse a partir de sus variables. Existen muchos tipos de sistemas (continuos o discretos, causales o no causales, lineales o no lineales, variantes o invariantes, univariantes o multivariantes, deterministas o estocásticos, etc.) y métodos de control (continuo, discreto, clásico, robusto, óptimo,

adaptativo, etc.) Sin embargo, el objetivo básico es que las variables controladas sigan una referencia preestablecida.

“Desde el punto de vista de la teoría de control, un sistema o proceso está formado por un conjunto de elementos relacionados entre sí que ofrecen señales de salida en función de señales o datos de entrada. Es importante resaltar el hecho de que no es necesario conocer el funcionamiento interno, o cómo actúan entre sí los diversos elementos, para caracterizar el sistema. Para ello, sólo se precisa conocer la relación que existe entre la entrada y la salida del proceso que realiza el mismo (principio de caja negra). El aspecto más importante de un sistema es el conocimiento de su dinámica, es decir, cómo se comporta la señal de salida frente a una variación de la señal de entrada. Un conocimiento preciso de la relación entrada/salida permite predecir la respuesta del sistema y seleccionar la acción de control adecuada para mejorarla. De esta manera, el diseñador, conociendo cuál es la dinámica deseada, ajustará la acción de control para conseguir el objetivo final”.

“El avance de la electrónica permite hoy en día realizar sistemas de control en lazo cerrado; es decir, sistemas de control en los que la señal de salida tiene efecto sobre la acción de control. A este efecto se le denomina realimentación. La figura 16 muestra este proceso. Como puede observarse, la señal controlada debe realimentarse y compararse con la entrada de referencia, tras lo cual se envía a través del sistema una señal de control, que será proporcional a la diferencia encontrada entre la señal de entrada y la señal medida a la salida, con el objetivo de corregir el error o desviación que pudiera existir. La principal ventaja de los sistemas de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación hace al conjunto menos sensible a las perturbaciones externas y a las variaciones de los parámetros internos que los sistemas en lazo abierto”.

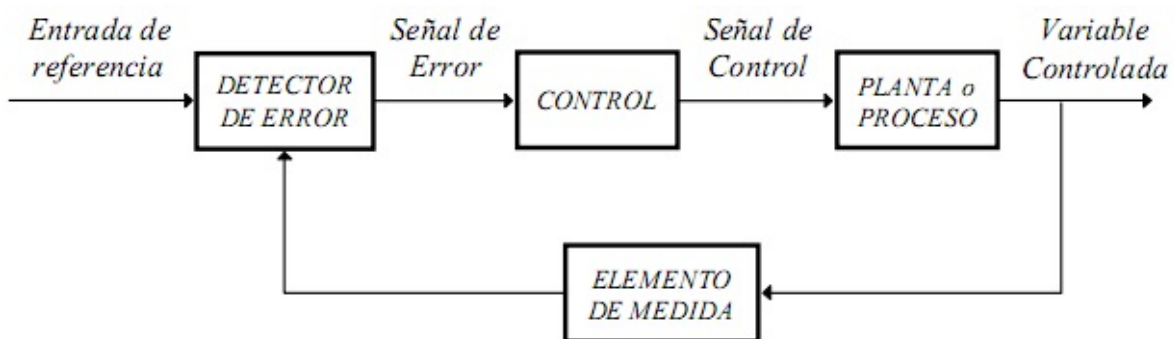


Figura 16. Diagrama de bloques típico para un sistema de control en lazo cerrado.  
Fuente: (Biel, Gomariz, Matas, & Reyes, 1999)

### 3.1.4. Estrategia de control

Tabla 10. Parámetros y variables de cultivo de *Spirulina*

| VARIABLE                     | SENSADO             | REGULACIÓN                             | PARÁMETROS DE CONTROL | SISTEMA DE CONTROL        |
|------------------------------|---------------------|--|-----------------------|---------------------------|
| Salinidad                    | Conductividad       | Inyección de salmuera o agua           | 0.037 %               | Figura 16                 |
| PH                           | Potencial eléctrico |  | 8 - 11                | Figura 16                 |
| Temperatura                  | Temperatura         |  | 25°C- 35°C            | Figura 16                 |
| Regulación de Oxígeno        | Oxígeno             | Blower continuo.<br>Bomba peristáltica | No aplica             | No aplica                 |
| Luminosidad                  | Luz natural         |  | No aplica             | No se controla            |
| Requerimientos nutricionales | Medio Zarrouk       |  | No aplica             | No se controlan           |
| Agitación                    | Paletas rotativas   |  | 1.2-1.6 gr/ L         | Velocidad de las paletas. |

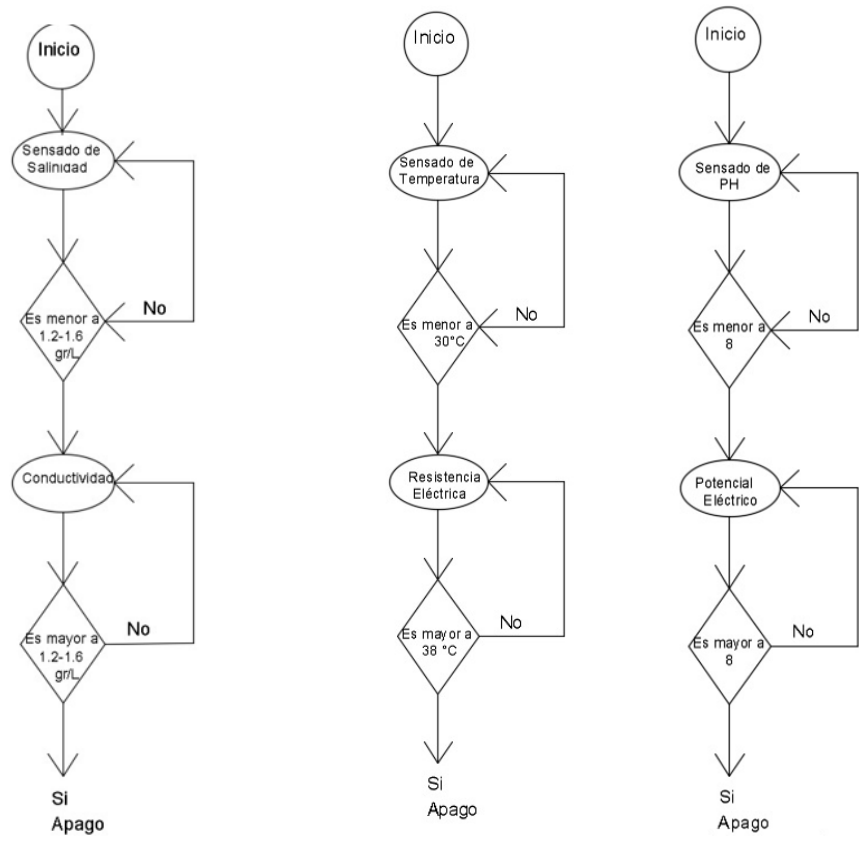


Figura 17. Diagramas de flujo de Salinidad, Temperatura, y PH. Elaboración propia.

## **4. DESARROLLO DEL PROTOTIPO: PLANOS MATERIALES Y ESTRATEGIA DE CONTROL**

### **IMPLEMENTACION DE LAS VARIABLES FISICOQUIMICAS EN UN PROTOTIPO A ESCALA.**

La automatización resulta fundamental para la optimización de recursos y tiempos a la hora de hacer un proceso determinado, hay muchos procesos que se pueden automatizar para mejorar la calidad del mismo y con esto reducir los costos a largo plazo que se puedan implicar. Este prototipo automatizado busca, primero, estudiar la adecuación de las variables de software en una plataforma que por ser de acceso abierto (Arduino) favorece su apropiación. Y en segundo lugar, ilustrar su implementación en un prototipo constantemente monitoreado, manteniendo los valores deseados de PH, temperatura y salinidad. Como se ha mencionado, son variables que juegan un papel crucial en la consistencia, calidad y productividad de la Spirulina.

El prototipo a través de los sensores para las variables de PH, salinidad, temperatura, será capaz de monitorearlas, medirlas en tiempo real y controlarlas a través de diferentes formas de autorregulación, el PH, temperatura y salinidad, están interrelacionadas en su comportamiento en el medio de cultivo. Así, una de las formas de adecuar su balance será por medio de carbonatos de calcio u otras forma de carbono (fuente principal de sales inorgánicas que requiere el cultivo), así como otras sales y demás compuestos para la solución nutritiva, que se añadirán cuando los parámetros no sean los óptimos, adicionando las concentraciones calculadas adecuadamente para la biomasa requerida. Además, el prototipo es capaz de realizar agitación y cosecha automatizada mediante una paleta, la cual tendrá un movimiento a todo lo largo del prototipo y por ende del medio del cultivo. A continuación, se presenta una descripción detallada de las partes que lo componen, con sus respectivas especificaciones. Posteriormente se presentan los planos y renders que ilustran como se articulan las partes. A partir del código y con componentes de bajo costo, como los que se utilizan aquí, se puede implementar un sistema de control automático, en cultivos que pueden diseñarse de acuerdo a las necesidades de producción. Así contribuiremos a la apropiación de la producción automatizada de Spirulina. Por último, en el anexo 1 se presenta el código de control en Arduino.

## PH

El prototipo utilizará un electrodo con un circuito embebido capaz de medir el valor del PH del agua en tiempo real (figura 18).



Figura 18. Medidor de PH. Fuente (Heptro, 2107).

### ESPECIFICACIONES:

- Potencia del módulo: 5.00V
- Tamaño del módulo: 43 x 32 mm
- Rango de medición: 0 - 14PH
- Temperatura de medición: 0 - 60 °C
- Precisión:  $\pm 0.1\text{pH}$  (25 °C)
- Tiempo de respuesta:  $\leq 1\text{min}$
- Sensor de pH con conector BNC
- Interfaz pH2.0 (parche de 3 pines)
- Potenciómetro de ajuste de ganancia
- LED indicador de energía

El código de control para su implementación en el prototipo se puede consultar en el Anexo 1.

## TEMPERATURA DEL AGUA

La medición de la temperatura del agua en tiempo real se realizará con el sensor de temperatura DS18B20, el cual brinda una buena calidad de medición. Este sensor cuenta con un blindaje de aluminio que le permite estar sumergido (figura 19).

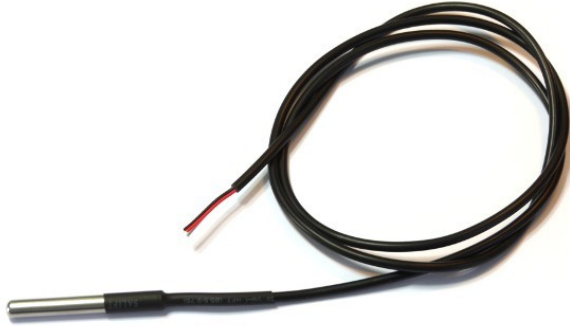


Figura 19. Medidor de Temperatura del agua (Heptro, 2107).

### ESPECIFICACIONES

- Rango de temperatura utilizable:  $-55$  a  $125$  ° C ( $-67$  ° F a  $257$  ° F).
- Resolución 9 a 12 bits.
- Precisión:  $\pm 0,5$  ° C  $-10$  ° C a  $+85$  ° C.
- Alarma para temperatura limite.
- Periodo de actualización 750ms.
- Voltaje de 3.0V a 5.5V.

### CARACTERÍSTICAS

- Dimensiones: 315mm x 0.60cm x 0.6cm.
- Peso: 63 g.
- Marca: OEM.
- Cantidad: 1 pieza

El código de control para su implementación en el prototipo se puede consultar en el Anexo 1.

## CONDUCTIVIDAD DEL AGUA

La salinidad es un parámetro importante en todos los sistemas de cultivo y afecta de manera significativa el crecimiento y la calidad; niveles bajos en sal podrían dar lugar a deficiencias nutricionales. La conductividad del agua puede reflejar el nivel de electrolitos presentes en el agua. La conductividad de la solución acuosa es diferente en función de la concentración del electrolito,

El módulo integrado al prototipo está diseñado especialmente para los controladores de Arduino y se ha incorporado en características simples, convenientes y prácticos (figura 20).

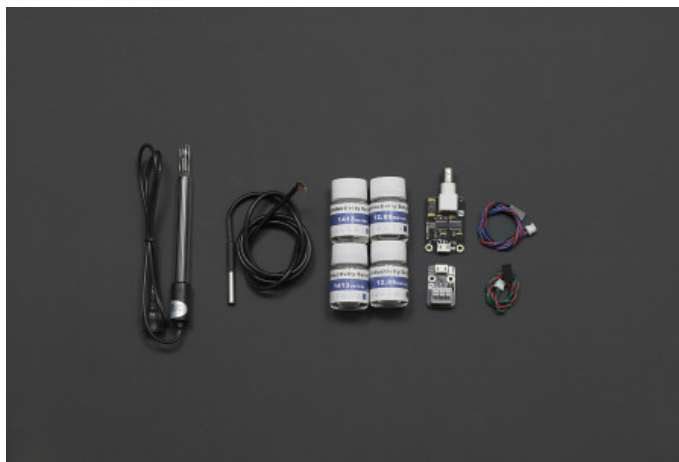


Figura 20. Medidor de Conductividad del agua. (Heptro, 2107)

## ESPECIFICACIONES

- Voltaje de funcionamiento: 5.00 V.
- Rango de medición: 1 ms / cm - 20 ms / cm.
- Temperatura de funcionamiento: 5-40°C.
- Precisión:  $<\pm 5\%$  F.S (10 bits utilizando Arduino ADC).
- PH 2,0 Interface (3 pines SMD).
- Sensor de temperatura de DS18B20(impermeable).
- Indicador de encendido.

## CARACTERÍSTICAS

- Dimensiones: 32.98x21.98x17.11 mm.
- Peso: 15 g.

- Marca: DFRobot.

El código de control del prototipo se puede consultar en el Anexo 1.

## TEMPERATURA AMBIENTAL Y HUMEDAD

Siendo que la temperatura juega un papel muy importante para la sobrevivencia de la Spirulina, temperaturas de alrededor de 35°C son las óptimas para la sobrevivencia del cultivo, en su medición de la temperatura ambiental y la humedad se utilizó la tarjeta con sensor DHT11 de humedad resistivo, ideal para sistemas de medición climatológicos o para controles de temperatura y humedad. Este sensor además incluye un sensor interno de temperatura NTC. Se trata de un módulo compatible con Arduino, con una gran relación señal a ruido ante la interferencia y muy durable (figura 21).



Figura 21. Medidor de Temperatura y humedad. (Heptro, 2107)

## ESPECIFICACIONES

- Sensor resistivo de humedad
- Modelo: DHT11.
- Sensor de temperatura NTC

- Voltaje de alimentación: 5V
- Rango de temperatura: 0-50°C
- Rango de humedad: 20-90%RH
- Tamaño: 25 x 16 x 7 mm
- Peso: 9g

El código de control para su implementación en el prototipo se puede consultar en el Anexo 1.

### **INSTENSIDAD DEL CULTIVO (SENSOR RGB)**

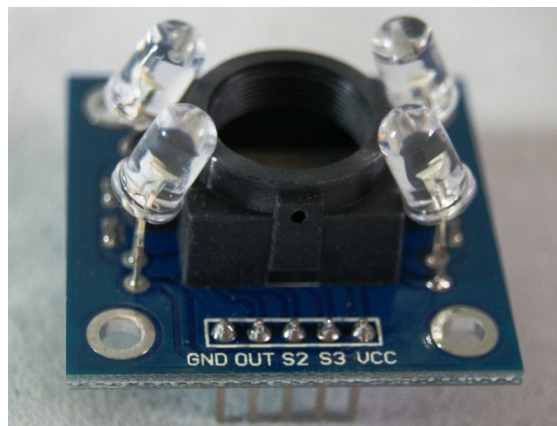


Figura 22. Sensor de color. (Heptro, 2107)

Una de las variables a medir en los cultivos acuáticos es la turbiedad como una forma de analizar el fitoplancton se da a través del color del medio acuático, así en este caso se utilizó para medir esa variable un Sensor de Color RGB TCS3200 con protección. Sus aplicaciones incluyen la lectura de tira reactiva, la clasificación por color, sensor de luz ambiental y de calibración, y la igualación de color, por nombrar sólo algunos. Es un detector de colores el cual integra el TAOS TCS3200, con 4 LEDs. El TCS3200 tiene un arreglo de foto-detectores, cada uno con filtro rojo, verde, azul o ninguno (transparente). Se utiliza en líneas de producción, domótica y robótica, y es compatible con Arduino.

#### **ESPECIFICACIONES**

- Operación de alimentación única: (2.7V to 5.5V)
- Alta resolución de conversión de intensidad de luz a frecuencia
- Comunicación directa con Microcontrolador
- Dimensiones: 28.4x28.4mm

El código de control para su implementación en el prototipo se puede consultar en el Anexo 1.

## ACTUADORES

### MOTOR A PASOS

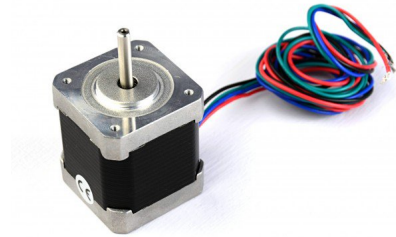


Figura 23. Motor a pasos (Heptro, 2107)

“Un motor a pasos es un dispositivo que transforma los impulsos eléctricos que recibe en sus terminales en movimientos angulares. Estos motores son especiales debido a que pueden avanzar en función de "pasos" que corresponden a un ángulo en específico. Los motores a pasos son ideales cuando se busca la precisión y repetitividad en función a la posición física”. Se utilizaron motores a pasos tipo NEMA 17 y 14 para el movimiento lineal de las paletas, la red y la pala que se encargara del cultivo como se muestra en las figuras 24 y 25:

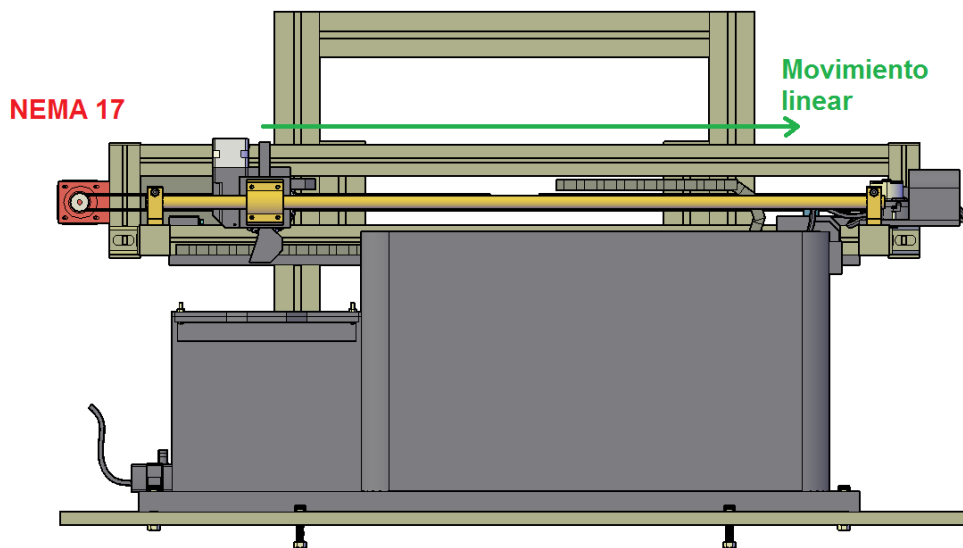


Figura 24. Alzado del Prototipo. Elaboración propia.

## ESPECIFICACIONES DEL MOTOR A PASOS NEMA 17

Pasos por revolución: 200.

Corriente: 1.68 A por la bobina.

Rango de voltaje: 2,8 V.

Torque 3,7 kg-cm (51 oz-pulg).

Inductancia por fase: 3.2 mH por bobina.

Longitud del cable: 30 cm (12 ").

Resistencia: 1.65  $\Omega$  por bobina

## ESPECIFICACIONES DEL MOTOR A PASOS NEMA 14

- Pasos por revolución: 200.
- Corriente: 280mA.
- Rango de voltaje: 7.4V.
- Torque 650g/cm.
- Resistencia: 26 Ohm.
- Inductancia por fase: 19.2mH.

## CARACTERISTICAS

- Dimensiones: 35x35x26 mm.
- Peso: 130g.
- Marca: Pololu

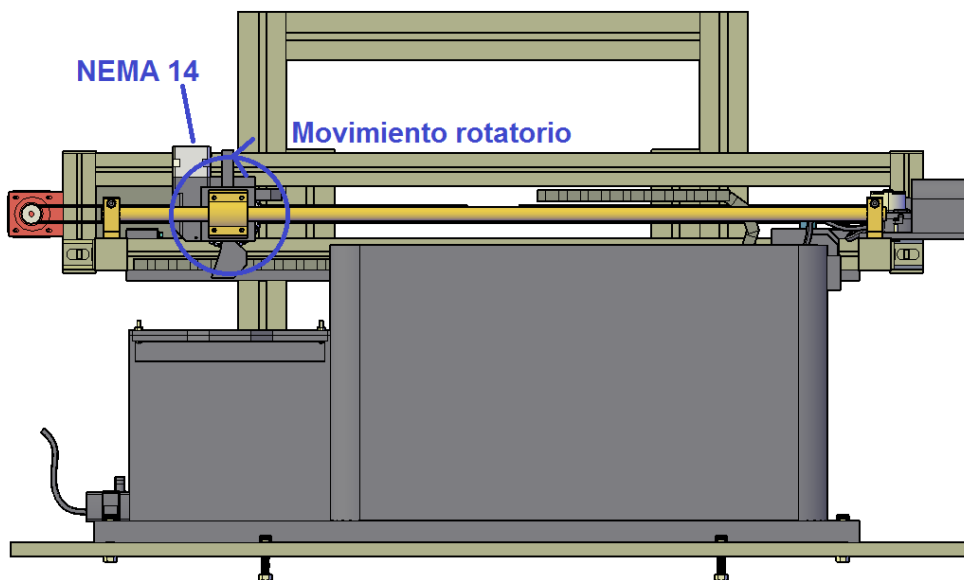


Figura 25. Alzado del Prototipo. Localización del motor a pasos. Elaboración propia.

El código de control para su implementación en el prototipo se puede consultar en el Anexo 1.

## MOVIMIENTO ROTATORIO

Es indispensable agitar el cultivo de Spirulina, para la dispersión homogénea de la cianobacteria en el líquido y la exposición a la luz por parte de todos los filamentos, para tener activo su mecanismo fotosintético. Una agitación muy brusca puede estropear la Spirulina spp. provocando la aparición de espuma, es por esto, la importancia del control de velocidad que se da a través de las paletas.

Para el movimiento rotatorio se diseñó un mecanismo capaz de realizar el movimiento con las especificaciones que necesitamos, para ser impreso en 3D. Se diseñó la pala en 3D junto con los demás aditamentos para el correcto funcionamiento del robot. Los aditamentos se presentan en las figuras 26 a 28:

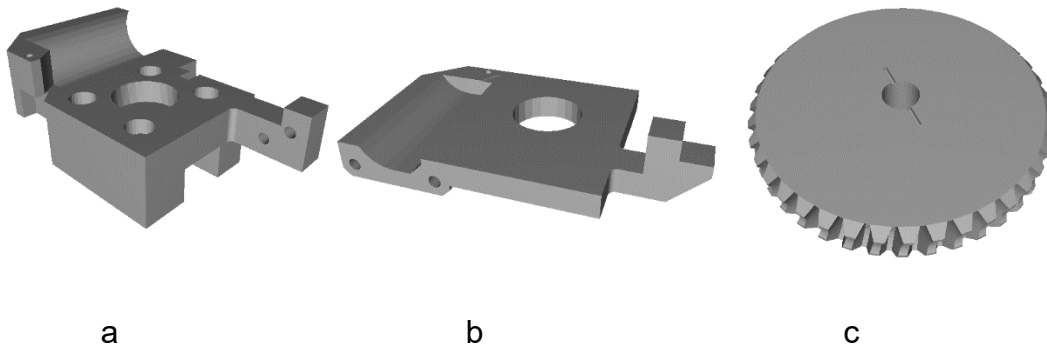


Figura 26. a. Carro lineal (1era mitad), b. Carro lineal (2da mitad), c. Engrane para movimiento rotatorio. Elaboración propia.

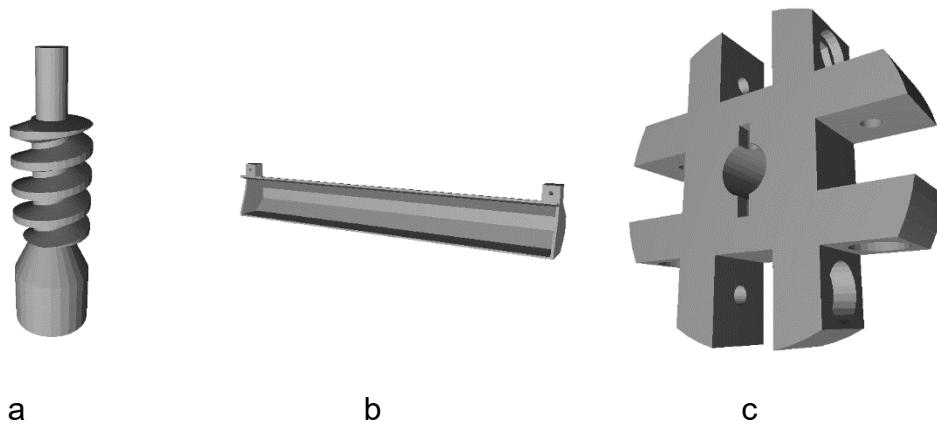


Figura 27. a. Tornillo sin-fin, b. Pala para recoger Spirulina, c. Selector de aditamento.  
Elaboración propia.

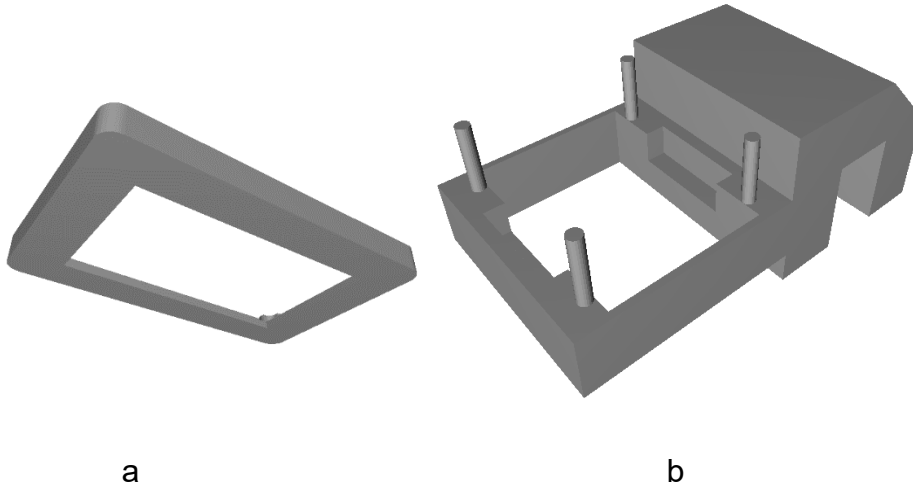


Figura 28. a. Marco para la pantalla HMI, b. Sujetador para el sensor RGB. Elaboración propia.

## BOMBA DE AGUA

La circulación del alga homogénea dispersión de los materiales en suspensión, oxigena y homogeniza el medio de cultivo y ayuda a una mejor regulación del crecimiento del microalga.

Se utilizó una bomba de agua de 12V para la circulación del líquido dentro de la pecera (Figura 29). Esta bomba posee un empuje máximo de hasta 1.9m.



Figura 29. Bomba de agua sumergible (Heptro, 2107)

## ESPECIFICACIONES

- Dimensión de salida: 8 mm.
- Ruido: menos de 35 dB.
- Voltaje de trabajo: 5 a 12V.
- Empuje máximo estático: 1.9m de agua.
- Flujo máximo: 4L/Min.
- Potencia: 4.8W.

## CARACTERÍSTICAS

- Dimensiones: 34x36.50x39 mm.
- Peso: 50 g.
- Marca: OEM.

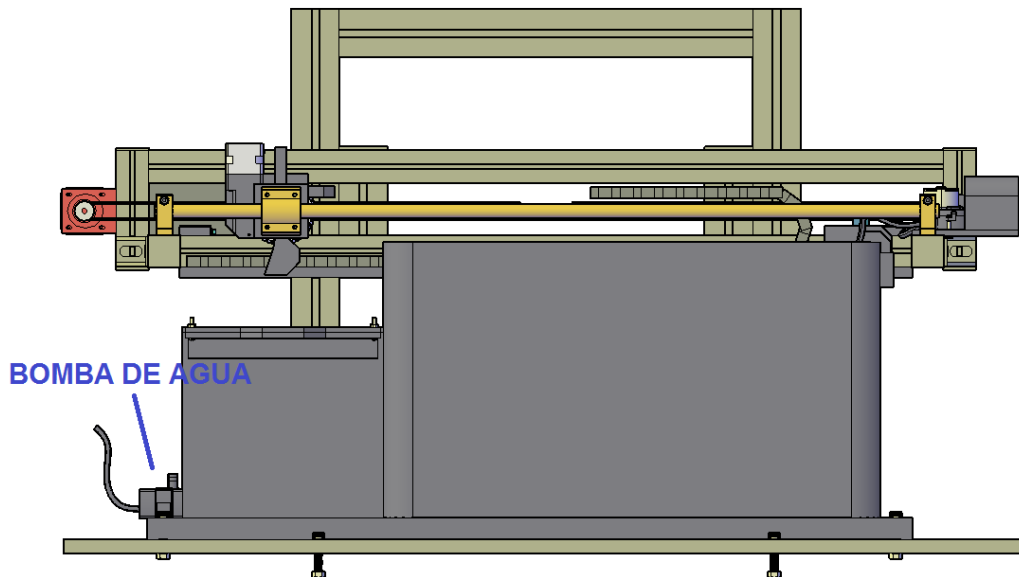


Figura 30. Ubicación de la Bomba de agua sumergible en el Prototipo. Elaboración propia.

El código de control para su implementación en el prototipo se puede consultar en el Anexo 1.

## BOMBA PERISTÁLTICA

Se utilizó una bomba peristáltica para ingresar los nutrientes requeridos al organismo y/o en su caso ayudar a separar la capa superficial del cultivo (Spirulina) para aminorar la densidad, y mantener el PH estable (Figuras 31 a 33):



Figura 31. Bomba peristáltica

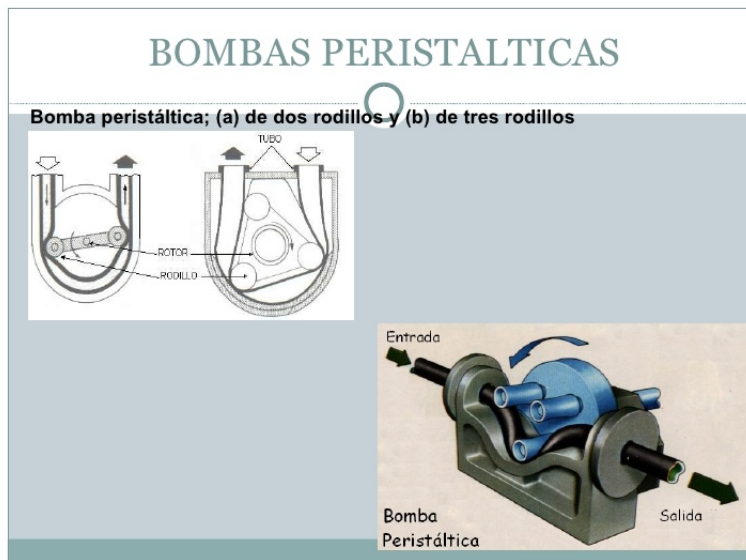


Figura 32. Bomba peristáltica

- ESPECIFICACIONES
- Voltaje: 6V.
- Corriente: 30mA.
- Temperatura de trabajo: 0° - 40°C.

- Humedad relativa: <80%.
- Flujo: 20-60 ml/min.
- Velocidad: 0.1 - 60 RPM

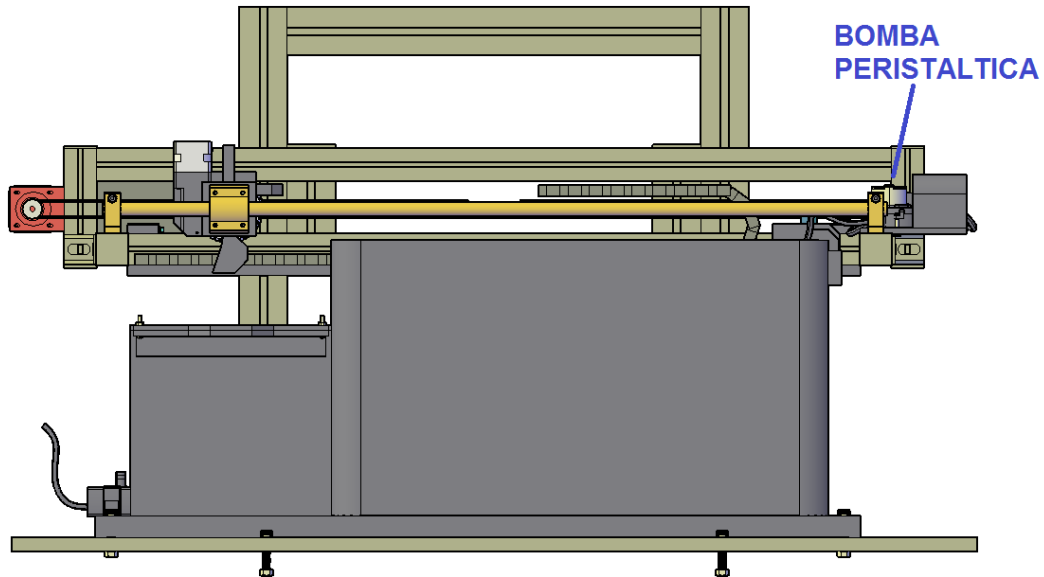


Figura 33. Ubicación de la Bomba peristáltica en el Prototipo. Elaboración propia.

El código de control para su implementación en el prototipo se puede consultar en el Anexo 1.

### **PROTOTIPO DEL DOMO PARA CULTIVO**

Para nuestro prototipo se utilizaron dos tanques, uno de vaciado donde la Spirulina se podrá dejar escurrir de agua y la solución nutritiva, y el otro donde se generará todo el cultivo de la misma (pecera) (figuras 34 a 36).

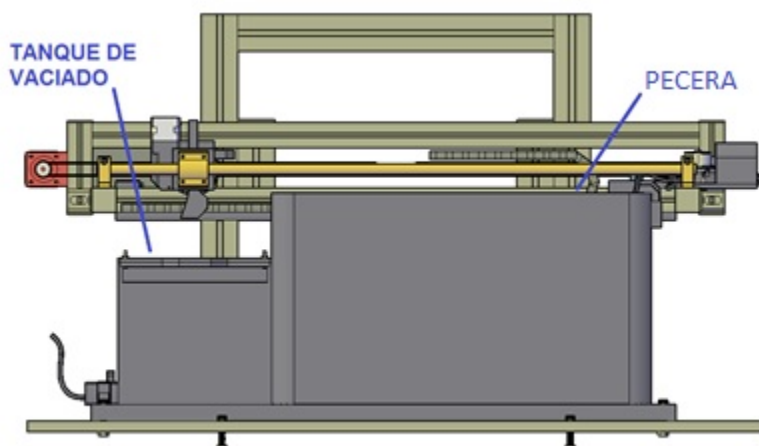


Figura 34. Alzado del Prototipo. Ubicación de los tanques y/o depósitos del cultivo. Elaboración propia.

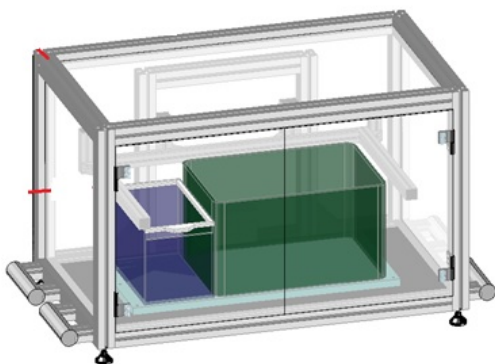


Figura 35. Depósitos del medio de cultivo.

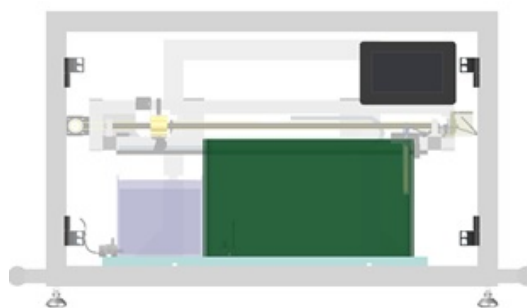


Figura 36. Alzado de la estructura con el domo

Elaboración propia.

## DIMENSIONES DEL DOMO

La cosechadora principal cuenta con un domo hecho en perfiles de aluminio y acrílico con el fin de proteger el cultivo de agentes contaminantes y conservar la temperatura. Las figuras 37 y 38 muestran las dimensiones del domo en el contexto del prototipo general, y la figura 39 muestra el detalle de las dimensiones del domo.

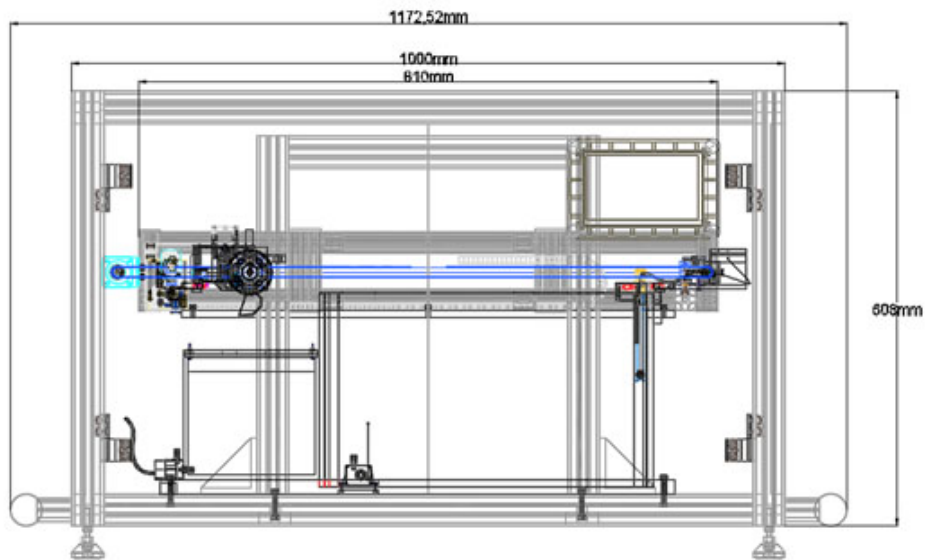


Figura 37. Alzado longitudinal con las dimensiones del domo. Elaboración propia.

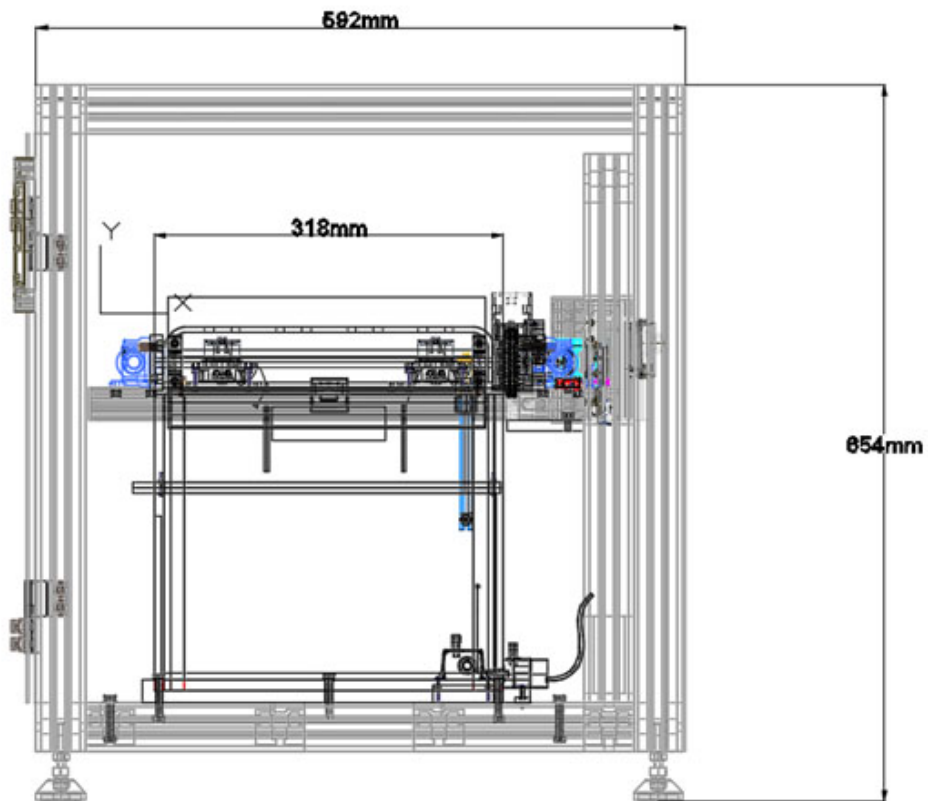
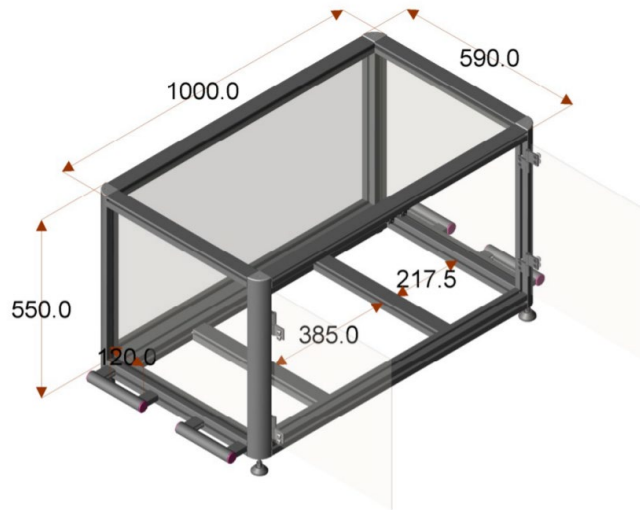
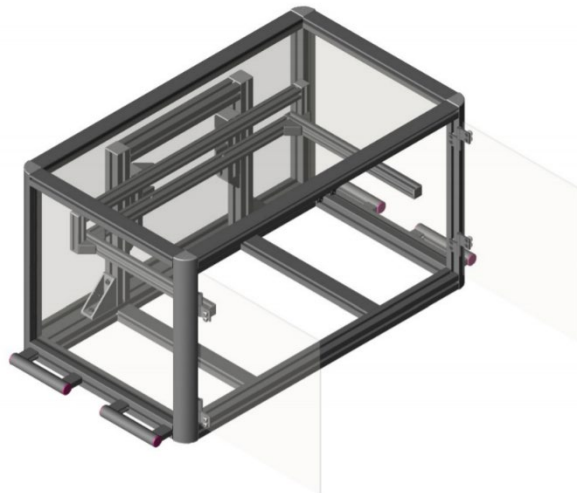


Figura 38. Alzado Transversal con las dimensiones del domo. Elaboración propia.



a



b

Figura 39. Vista general con las dimensiones del domo y detalle de toda la estructura de soporte a. Dimensiones del domo, b. Detalle de la estructura de soporte y el domo. Elaboración propia.

## INTERFAZ HMI

Para nuestro proyecto se optó por implementar una interfaz HMI. Esta interfaz Humano-Máquina permite interactuar con las variables que se van a medir en el cultivo (figura 40).



Figura 40. Interfaz HMI (Heptro, 2107)

### ESPECIFICACIONES:

- Pantalla de 7.0".
- Resolución: 800x480.
- Compatible con Raspberry Pi A+, B+, Raspberry Pi 2 y Arduino.
- Pantalla TFT con interfaz TTL.
- Consumo de 5V y 510mA.
- Area: 154.08mm(L)×85.92mm(A)

- Memoria de 16MB Flash.

### CARACTERÍSTICAS

- Dimensiones: 181x108x09 mm.
- Peso: 264 g.
- Marca: Itead Studio.

### TARJETA DE DESARROLLO

Los diferentes sistemas mostrados anteriormente son controlados por una tarjeta de desarrollo Arduino MEGA. Es el cerebro del proyecto que se encarga de llevar a cabo las instrucciones requeridas para los movimientos y el sensado de las variables (figura 41).

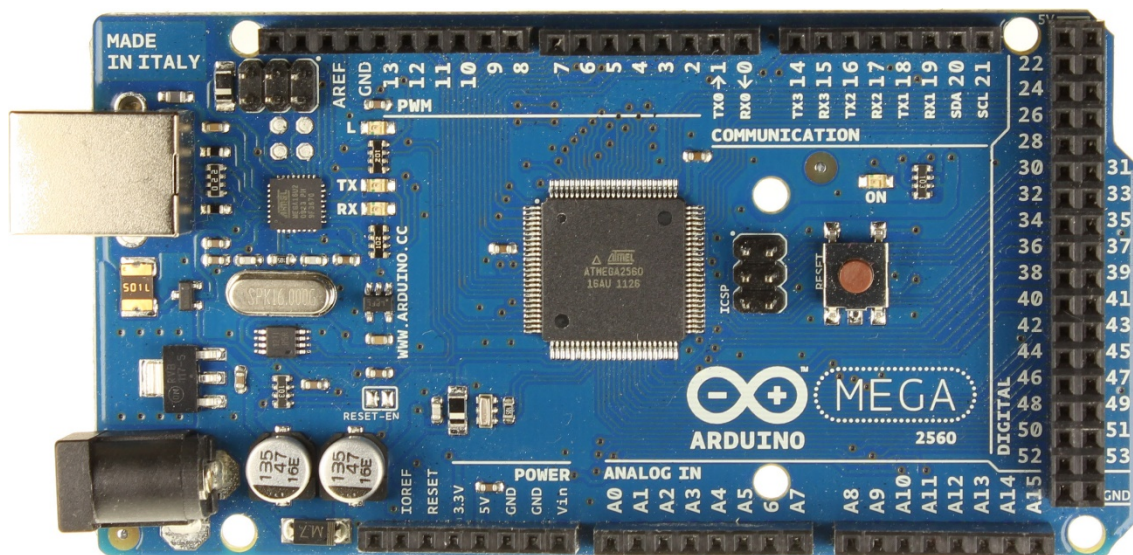


Figura 41. Tarjeta Arduino (Heptro, 2107)

### ESPECIFICACIONES

- Microcontrolador: Atmega2560
- Voltaje de funcionamiento: 5V
- Voltaje de entrada (recomendado): 7-12V
- Voltaje de entrada (límites): 6-20V
- Pines E / S digitales: 54 (de los cuales 15 proporcionan PWM)
- Pines de entrada analógica: 16

- DC Corriente por I / O Pin: 40 mA
- Corriente CC para Pin 3.3V: 50 mA
- Memoria Flash: 256 KB de los cuales 8 KB usados por bootloader
- SRAM: 8 KB
- EEPROM: 4 KB
- Velocidad del reloj: 16 MHz

## CIRCUITO PROPUESTO

Las diferentes partes o subsistemas de control fueron integrados en un circuito que funciona de forma automatizada. El esquemático del circuito se muestra en la figura 42.

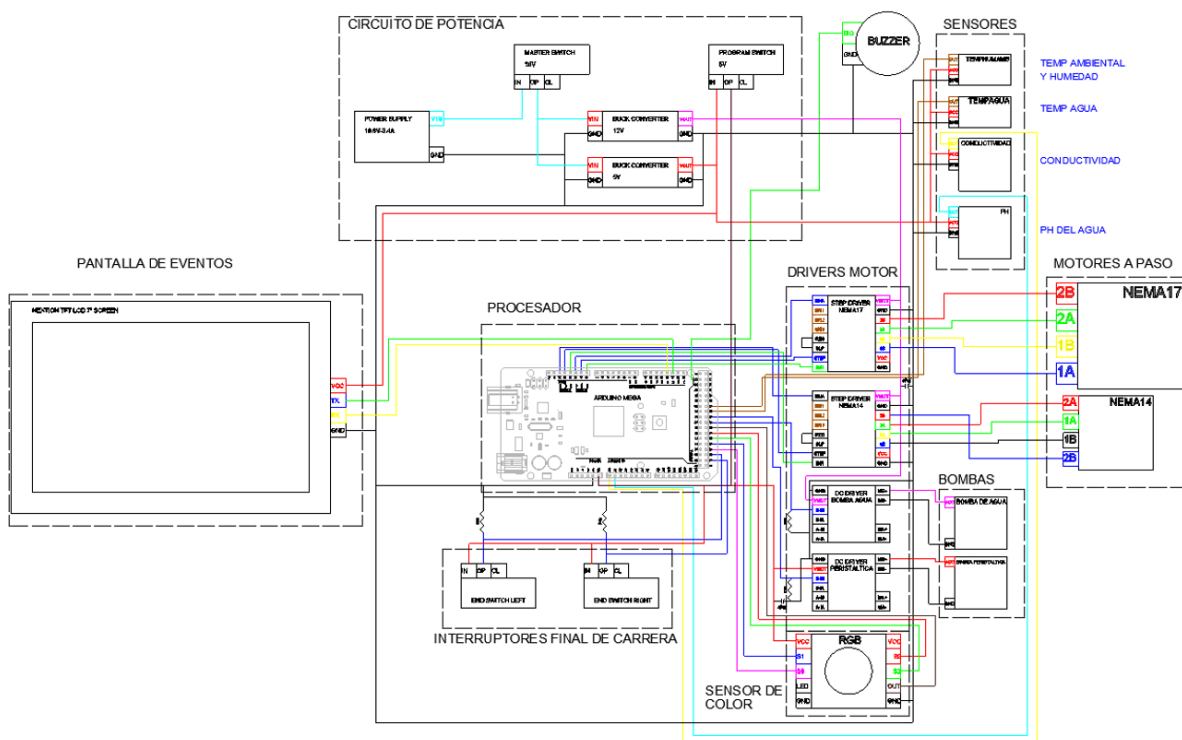


Figura 42. Circuito de control propuesto. Elaboración propia.

## ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES DEL CIRCUITO:

1. POTENCIA:
  - 2 Convertidor Dc-dc XI6009 Booster Step Up Voltaje Arduino (seteados a 5VDC y 12VDC)
  - Fuente de poder de 19.6V 3.4A

- Switch de encendido
- Switch para encender el procesador

## 2. ACTUADORES

- Motor a pasos nema 17hs3001-20b
- Motor a pasos nema 14 7.4v 200 pasos/rev
- 2 a4988 controlador de motor a pasos
- 2 controlador de motor dc l9110
- Bomba peristáltica de agua 6v (capa blanca)
- Bomba de agua sumergible con motor brushless 4l/min hkp-bl168ea

## 3. SENSORES

- Kit sensor de ph
- Kit sensor de conductividad
- Ds18b20 sensor de temperatura del agua
- Sensor de temperatura y humedad del ambiente dht11
- Sensor de color rgb
- Sensor de color rgb tcs3200
- 2 interruptores de final de carrera
- 1 buzzer piezoelectrónico

## 4. TARJETA DE DESARROLLO

- Omega arduino mega 2560 r3 compatible
- HMI
- Pantalla nextion nx8048t070 7.0" 800x480 uart touch

## 5. MATERIALES DEL DOMO:

- Perfiles de aluminio de la marca MINITEC (30x30, 45x45, 90x45)
- Acrílicos para la pecera y las paredes del domo

## 6. MATERIALES PARA LOS MOVIMIENTOS LINEARES:

- 2 baleros lineales de 12mm
- 2 barras de tungsteno/aluminio para los baleros lineales de 12mm
- 4 chumaceras de 12mm
- 2 poleas dentadas GT2
- 1 banda dentada de 6mm para las poleas GT2

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se buscó mitigar los problemas de insustentabilidad asociados a la producción de alimentos a partir de la implementación de las variables fisicoquímicas que controlan la producción de alga spirulina y su puesta en marcha en un prototipo a escala que puede ser utilizado a nivel de los hogares. Este desarrollo tecnológico abierto, se busca que promueva la autoproducción sustentable de alimentos. Dicha implementación de variables puede ocurrir en diversos diseños y ambientes. Sin embargo, se ilustra una aplicación concreta en un prototipo con cultivo en ciclo cerrado y con cosecha automática de Spirulina a nivel doméstico, que controla las variables más importantes. Con base en las experiencias de otros sistemas de producción en ciclo abierto donde la productividad en biomasa es de 2.846 mg/L/día<sup>1</sup> y con las dimensiones del prototipo propuesto la producción podría llegar a ser 220 mg/L/día<sup>1</sup>. Siendo la capacidad del tanque de producción de alrededor de 30 litros y teniendo como periodo de cosecha entre 1-4 semanas, la literatura marca como referencia que un cultivo con estas características puede producir alrededor de 8-10 kilos en este periodo en condiciones intensivas. Lo cual significaría para una familia promedio, una barata e importante fuente de proteínas, vitaminas, minerales de muy alta calidad. Al mismo tiempo, y en la medida en que la tecnología se socialice, significaría una contribución importante para la sustentabilidad ambiental; como se ha mencionado, los alimentos actuales no sólo son de mala calidad, sino que destruyen la naturaleza. En este sentido, la principal aportación de este trabajo fue primero, la identificación de un problema sistémico en las sociedades modernas: altos niveles de destrucción de la naturaleza para generar alimentos de baja calidad. Luego, el planteamiento de una propuesta de solución a partir de una reorientación de los patrones de consumo hacia una fuente de alimento de muy alta calidad que, gracias a los avances recientes en ingeniería electrónica, podría producirse con relativa facilidad y sin tanta destrucción. Posteriormente, la definición de las variables desde la acuicultura y, por último la implementación de las variables fisicoquímicas de control en un esquema de control basado en tecnologías abiertas y de bajo costo. Por último, una posibilidad de concretar la implementación en un prototipo a escala, que también fue construido. El modelo desarrollado aunque a pequeña escala puede servir de referencia y fácilmente replicado a una escala mayor con los diagramas y planos proporcionados, pero con equipos más robustos (motores), y diferentes sensores, adecuándolos a un proceso y volúmenes distintos, en cuyo caso se necesitaría adaptar el hardware, pero la programación de la automatización y el método de sensado y control automático está resuelto, pues la interconexión electrónica parte de un principio y base en común. Aunque si bien, el

diseño desarrollado (biorreactor), tuvo como propósito ser una fuente de alimentación vía producción de spirulina, puede también ser útil para otros tipos de cultivos de producción de alimentos como: fitoplancton (microalgas), zooplancton, pequeños crustáceos (*Artemia salina*) etc. Adaptando las variables fisicoquímicas y de control automático. Sin embargo, el aporte real de este trabajo a la sustentabilidad queda sujeto a dos futuras líneas de trabajo. Primero, a la adaptación de la implementación que hemos realizado por parte del usuario y las condiciones del cultivo. Pues aunque la implementación que generamos permite ajustar las variables a las condiciones del usuario, estas cambiarían en cada caso y nuestro prototipo es solo una posibilidad en la que no se ha determinado rigurosamente las mejores condiciones de producción. Segundo, a su adopción social, que requeriría un esfuerzo importante desde la mercadotecnia para interesar a la sociedad, y desde el diseño industrial para volverlo más amigable y reducir los costos; pues, aunque la adopción de esta tecnología podría pagarse en poco tiempo, considerando los altos costos de la Spirulina actualmente, queda aún fuera del alcance de personas de muy bajos recursos. En suma, hemos contribuido a liberar una tecnología, cara, que actualmente está solo al alcance de empresas y universidades; lo cual nos pone mucho más cerca de su apropiación. Se espera que una vez definido el problema y planteada una posibilidad de solución libre y relativamente simple, otros la modifiquen y la mejoren. Terminé este trabajo con la esperanza de que esto genere un movimiento social que se traduzca en la resolución del importante problema que hemos abordado aquí.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Adelberg, E. A., Ingraham, J. L., & Stainer, R. Y. (1986). *Microbiología*. Mexico, D.F.: Ediciones REPLA, S.A.
- Alemán, T. (2014). Dilema de sobrevivencia. *ECOFRONTERAS*, 3-7.
- Arellano, J. (2002). *Introducción a la INGENIERIA AMBIENTAL*. Mexico, D.F: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V. e Instituto Politecnico Nacional.
- Bettini, V. (1998). *Elementos de Ecología urbana*. Madrid: Trotta.
- Biel, D., Gomariz, S., Matas, J., & Reyes, M. (1999). *Teoría de Control. Diseño electrónico*. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Cardenas, J., Diaz, M., & Vizcaino, M. (2017, octubre 26). *www.research.net*. Retrieved Septiembre 12, 2017, from [https://www.researchgate.net/profile/Jose\\_David\\_Cardenas-Nieto/publication/259601864\\_Industrializacion\\_del\\_Alga\\_Spirulina/links/5609bb8108ae576ce63eed2c/Industrializacion-del-Alga-Spirulina.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jose_David_Cardenas-Nieto/publication/259601864_Industrializacion_del_Alga_Spirulina/links/5609bb8108ae576ce63eed2c/Industrializacion-del-Alga-Spirulina.pdf)
- Castelló, O. F. (1993). *Acuicultura marina: Fundamentos Biológicos y tecnología de la Producción*. Barcelona: PUBLICACIONES DE LA UNIVERSITAT DE BARCELONA.
- CK-12 Foundation, B.-R.-2. (2017, Octubre 26). <http://ck12.org/>. Retrieved Septiembre 1, 2017, from <https://openlibra.com/es/collection/search/category/biologia>: <https://openlibra.com/es/collection/search/category/biologia>
- Clark, D. P., Dunlap, P. V., Madigan, M. T., & Martinko, J. M. (2009). *Brock. Biología de los microorganismos*. Madrid: PEARSON EDUCACION, S.A.
- Correa, D., & Torres, B. (2008). *www.eafit.edu.co*. Retrieved junio 2017, from [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/393/BernardoDavid\\_TorresUrang\\_o\\_2008.pdf?sequence=3](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/393/BernardoDavid_TorresUrang_o_2008.pdf?sequence=3)
- Culebro, J. (2015). <http://studylib.es/doc/7586526/master-en-sostenibilidad-de-la-upc>. Retrieved septiembre 10, 2017, from <http://studylib.es/doc/7586526/master-en-sostenibilidad-de-la-upc>
- Culebro, J. (n.d.). <http://studylib.es/doc/7586526/master-en-sostenibilidad-de-la-upc>. Retrieved septiembre 10, 2017, from <http://studylib.es/doc/7586526/master-en-sostenibilidad-de-la-upc>
- Dreckmann, K. M., Nuñez, M. I., & Senties, A. (2013). *Manual de prácticas de laboratorio. Biología de Algas*. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.

- FAO. (2017, octubre 26). *fao.org*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i5798s.pdf>
- Harding, S. (2006). *ANIMATE EARTH Science, Intuition and Gaia*. Green Books.
- Heptro. (2107, octubre 27). *Heptro*. Retrieved from <https://hetpro-store.com/>
- Hough, M. (1998). *Naturaleza y Ciudad. Planeacion Urbana y Proceso Ecologicos*. Barcelona: Gustavo Gili, S.A.
- <http://asociacionvegetarianavidasana.blogspot.mx/2012/06/el-alga-espirulina.html>. (n.d.). Retrieved setiembre 11, 2017, from <http://asociacionvegetarianavidasana.blogspot.mx/2012/06/el-alga-espirulina.html>
- <http://umh1156.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/754/2013/02/Tema-2.1.pdf>. (n.d.). *www.umh.es*. Retrieved Septiembre 12, 2017, from [http://www.umh.es/buscador/Universidad/search\\_es.html?search=tema+2.1+alga+procaritas](http://www.umh.es/buscador/Universidad/search_es.html?search=tema+2.1+alga+procaritas)
- Janhns, H., Mann, D., & Van den Hoek, C. (1995). *Algae. An introduction to phycology*. New York: Cambridge University Press.
- Keith, C. (1993). *ECOLOGIA Ciencia y política mediambiental*. Madrid: McGrawHill.
- Llorente, M., & Maaud, E. (1982). La contribucion de los desarrollos acuicolas al sistema alimentario mexicano. *TESIS*. Mexico, D.F., Mexico: Universidad Iberoamericana.
- López, A. (2011). *espe.edu.ec*. Retrieved septiembre 10, 2017, from <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5015/1/T-ESPE-033046.pdf>
- Mendoza, H., De la Jara, A., & Portillo, E. (2017, octubre 31). *cienciacanaria*. Retrieved from *cienciacanaria.es* Web Site: <http://www.cienciacanaria.es/files/Planta-piloto-de-cultivo-de-microalgas.pdf>
- Morales, J., & al, e. (2011). *La Agroecologia en la construccion de alternativas hacia la sustentabilidad rural*. Méxcio, D.F.: Siglo XXI Editores/ Instituto de Estudios Superiores de Occidente.
- Ogata, K. (1996). *Sistemas de Control en tiempo Discreto*. Naucalpan, Edo. de México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
- Ogata, K. (1998). *Ingenieria de Control Moderna*. Naucalpan, Edo. de Mexico: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
- Piedrahita, J., & Urbano, S. (n.d.). <https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/3244/1/TME00998.pdf>.

- Richmond, A. (2004). *Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology*. Singapore: Blackwell Science Ltd. a Blackwell Publishing Company.
- Richmond, Amos. (2006). *HANDBOOK OF Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology*. Singapur: Blackwell Publishing.
- Rodriguez, R., & Triana, F. (2017, Octubre 27). *www.javeriana.edu.co*. Retrieved Junio 13, 2017, from <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis261.pdf>
- Rogers, R., & Gumuchdjian, P. (2000). *Ciudades para un pequeño planeta*. Barcelona : Gustavo Gili, SA.
- Soriano, P. (2014, Junio). <https://www.ual.es>. Retrieved Junio 13, 2017, from <http://repositorio.ual.es/handle/10835/3372>
- Wuest, J. (2006). Democracia y desafío medioambiental en Mexico. Riesgos , retos y opciones en la nueva era de la globalizacion, de Miiram Alfie Cohen. *Sociológica 21 ( ) septiembre-diciembre*, 163-203.
- Yañez, A. .. (1986). *Ecología de la zona costera. Análisis de siete tópicos*. México, D.F.: A.G.T Editor, S.A.
- Yeang, K. (1999). *Proyectar con la naturaleza. Bases ecologicas para el proyecto arquitectonico*. Barcelona: Gustavo Gili, S A.
- Yeang, K. (2001). *El rascacielo ecologico*. Barcelona: Gustavo Gili, SA.

## **ANEXO 1. Sistema de control del prototipo.**

```
//COSECHADORA DE SPIRULINA
//Copyright (C)2017
//400 x 240 TFT
//LIBRARIES THAT WILL BE INCLUDED
#include <memorysaver.h>
#include <UTFT.h> // Load UTFT lib
#include <URTouch.h> // Load Touch Lib
#include <DHT.h> // Load DHT lib
#include <UTouch.h>
//ANALOG PORTS
#define xAxis 0
#define yAxis 1
#define SensorPin 3
//DIGITAL PORTS
#define dirPin 8
#define stepPin 9
#define resetPin 10
#define ccwPin 11
#define cwPin 12
#define DHTPIN 13
#define encoder0A 14
```

```

#define encoder0B 15

#define leftStop 16 #define rightStop 17 #define switchJoystick 20

#define BUZZ 21

#define DHTTYPE DHT11 //Type of DHT Sensor

//VALORES GLOBALES6

int xPos, yPos, switchJoystickState, xFixedPos, yFixedPos,
resolutionPos;

int leftButtonState = 0, rightButtonState = 0;

int speedM; int get_x = 0, get_y = 0, touch_x = 0, touch_y = 0;

float h, t;

float pHValue;

float t_agua = 0; float OD = 0;

unsigned long int avgValue;

float b;

int buf[10], temp;

int val, encoder0ALast = LOW, n = LOW;

int encoder0Pos = 0;

char currentPage;

int temperat = 1;

int palletSpeed = 110;

//LCD Fonts

extern uint8_t SmallFont[]; extern uint8_t BigFont[]; extern uint8_t
SevenSegNumFontPlusPlus[]; //BMPS

extern unsigned short TEMP_AMB[]; extern unsigned short TEMP_AGUA[]; extern
unsigned short REL_HUM[]; extern unsigned short PH[];

```

```

extern unsigned short DO[];

extern unsigned short WARNING[];

extern unsigned short SPIRULINA[];

//LIBRARIES SETUP

UTFT myGLCD(ILI9481, 38, 39, 40, 41); //UTFT myGLCD(ITDB32WC, 38, 39, 40,
41); //URTouch myTouch( 6, 5, 4, 3, 2);

UTouch myTouch( 6, 5, 4, 3, 2); DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); //Variable for
Arduino to COM with

the sensor

void setup() {

  // PIN DEFINITIONS

  pinMode(dirPin, OUTPUT);

  pinMode(stepPin, OUTPUT);

  pinMode(resetPin, OUTPUT);

  pinMode(ccwPin, OUTPUT);

  pinMode(cwPin, OUTPUT);

  pinMode(encoder0A, INPUT); //digitalWrite(encoder0A, HIGH);
  pinMode(encoder0B, INPUT); //digitalWrite(encoder0B, HIGH);

  pinMode(leftStop, INPUT);

  pinMode(rightStop, INPUT);

  pinMode(switchJoystick, INPUT);

  digitalWrite(switchJoystick, HIGH);

  //Buzzer

  tone(BUZZ, 440, 1000);

  //Initiate DHT Module

```

```

dht.begin();

//initiate LCD Module

myGLCD.InitLCD();

myGLCD.setFont(SmallFont);

myTouch.InitTouch(1);          myTouch.setPrecision(PREC_EXTREME);
Serial.begin(9600); //Se inicia la comunicaci3n serial

currentPage = 0;
}

void loop() {

  Serial.println("COSECHADORA SPIRULINA");

  drawWelcome();

  myGLCD.clrScr();

  drawRectangle(0x000000, 0, 0, 479, 240);

  drawRoundRectangle(0xFFFFFFFF, 0, 10, 477, 230); //touchTest();

  test();

  myGLCD.clrScr();

  tone(BUZZ, 440, 500);

  tone(BUZZ, 880, 500);

  tone(BUZZ, 1200, 500);

  drawRectangle(0x000000, 0, 0, 479, 240);

  drawRoundRectangle(0xFFFFFFFF, 0, 10, 477, 230);

  myGLCD.setFont(BigFont); drawText("HOME", 0xFFFFFFFF,
0x000000, 10, 5);

  myGLCD.drawBitmap(90, 25, 30, 30, TEMP_AMB); myGLCD.drawBitmap(90, 65,
30, 30, TEMP_AGUA);

```

```
myGLCD.drawBitmap(90, 105, 30, 30, REL_HUM); myGLCD.drawBitmap(90,
145, 30, 30, PH);

myGLCD.drawBitmap(90, 185, 30, 30, DO);

myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("T. Ambiental",
0xFFFFFFFF, 0x000000, 50, 45);

myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("T. del Agua",
0xFFFFFFFF, 0x000000, 50, 85);

myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("Humedad Relativa",
0xFFFFFFFF, 0x000000, 50, 125);

myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("pH", 0xFFFFFFFF,
0x000000, 50, 165);

myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("Oxigeno Disuelto",
0xFFFFFFFF, 0x000000, 50, 205);

myGLCD.setFont(BigFont); drawText("C", 0xFFFFFFFF, 0x000000,
120, 25);

myGLCD.setFont(BigFont); drawText("C", 0xFFFFFFFF, 0x000000,
120, 65);

myGLCD.setFont(BigFont); drawText("%", 0xFFFFFFFF, 0x000000,
120, 105);

myGLCD.setFont(BigFont); drawText("", 0xFFFFFFFF, 0x000000,
120, 145);

myGLCD.setFont(BigFont); drawText("", 0xFFFFFFFF, 0x000000,
120, 185);

currentPage = 1;
```

```

do {
  getpH();
  getTemp();
  getHm();
  getWaterTemp();

  myGLCD.setFont(BigFont); drawValueFloat(t, 0xFFFFFF,
0x000000, 50, 25, 1);    myGLCD.setFont(BigFont); drawValueFloat(t_agua,
0xFFFFFF, 0x000000, 50, 65, 1);

  myGLCD.setFont(BigFont); drawValueFloat(h, 0xFFFFFF,
0x000000, 50, 105, 1);

  myGLCD.setFont(BigFont); drawValueFloat(phValue,
0xFFFFFF, 0x000000, 50, 145, 1);

  myGLCD.setFont(BigFont); drawValueFloat(OD, 0xFFFFFF,
0x000000, 50, 185, 1);

  if (t < 20) myGLCD.drawBitmap(240, 25, 13, 13, WARNING);   if (t_agua < 20)
myGLCD.drawBitmap(240, 65, 13, 13,
WARNING);

  if (h < 20) myGLCD.drawBitmap(240, 105, 13, 13, WARNING);

  if (phValue < 6 || phValue > 10) myGLCD.drawBitmap(240,
145, 13, 13, WARNING);

  if (OD < 30) myGLCD.drawBitmap(240, 185, 13, 13, WARNING);

  delay(1000);
} while (currentPage = 1);
delay(5000);
}

```

```

void drawWelcome()
{
  myGLCD.clrScr();
  drawRectangle(0x000000, 0, 0, 479, 240);
  drawRectangle(0x2C6700, 0, 0, 479, 120);
  myGLCD.setFont(BigFont); drawText("COSECHADORA SPIRULINA",
0x2C6700, 0x000000, 10, 50);
  myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("Arq. Carlos Cruz
Lopez", 0x2C6700, 0x000000, 10, 150);
  myGLCD.drawBitmap(340, 145 , 120, 80, SPIRULINA);
  delay(2000);
}

//SENSORES
void getpH()
{
  for (int i = 0; i < 10; i++) //Get 10 sample value from the
sensor for smooth the value
  {
    buff[i] = analogRead(SensorPin);
    delay(10);
  }
  for (int i = 0; i < 9; i++) //sort the analog from small to
large
  {

```

```

for (int j = i + 1; j < 10; j++)
{
  if (buf[i] > buf[j])
  {
    temp = buf[i];
    buf[i] = buf[j];
    buf[j] = temp;
  }
}
}

avgValue = 0; for (int i = 2; i < 8; i++)          //take the
average value of 6 center sample

  avgValue += buf[i]; pHValue = (float)avgValue * 5.0 / 1024 / 6; //convert the
analog into millivolt pHValue = 3.5 * pHValue;          //convert the
millivolt into pH value

Serial.print("  pH:");
Serial.print(pHValue, 2);
Serial.println(" ");
digitalWrite(13, HIGH);
delay(800);
digitalWrite(13, LOW);
}

void getTemp()
{ t = dht.readTemperature(); //Se lee la temperatura

```

```

}
void getHm()
{
    h = dht.readHumidity(); //Se lee la humedad
}
void getWaterTemp()
{
}
//CUSTOM CORRECTION FUNCTIONS FOR RESOLUTION
//# 1 drawText with resolution and color correction
void drawText(char text[], long hexText, long hexBack, int x,
int y)
{
    x += 80;
    hexText = hexText ^ 0xfffff;
    hexBack = hexBack ^ 0xfffff;
    int rText = ((hexText >> 16) & 0xFF); // Extract the RR byte
    int gText = ((hexText >> 8) & 0xFF); // Extract the GG
    byte int bText = ((hexText) & 0xFF); // Extract the BB
    byte int rBack = ((hexBack >> 16) & 0xFF); // Extract the RR byte
    int gBack = ((hexBack >> 8) & 0xFF); // Extract the GG
    byte int bBack = ((hexBack) & 0xFF); // Extract the BB
    byte
    myGLCD.setColor(rText, gText, bText);
    myGLCD.setBackColor(rBack, gBack, bBack);
}

```

```

    myGLCD.print(text, x, y);
}

//# 2 drawValues with resolution and color correction
void drawValue(int value, long hexText, long hexBack, int x, int y, int length_num)
{
    x += 80;

    hexText = hexText ^ 0xfffff;
    hexBack = hexBack ^ 0xfffff;

    int rText = ((hexText >> 16) & 0xFF); // Extract the RR byte  int gText = ((hexText
    >> 8) & 0xFF); // Extract the GG

    byte  int bText = ((hexText) & 0xFF);    // Extract the BB

    byte  int rBack = ((hexBack >> 16) & 0xFF); // Extract the RR byte  int gBack =
    ((hexBack >> 8) & 0xFF); // Extract the GG

    byte  int bBack = ((hexBack) & 0xFF);    // Extract the BB

    byte

    myGLCD.setColor(rText, gText, bText);

    myGLCD.setBackColor(rBack, gBack, bBack);

    myGLCD.printNumI(value, x, y, length_num, '0');
}

void drawValueFloat(float value, long hexText, long hexBack, int x, int y, int
pres_num)
{
    x += 80;

    hexText = hexText ^ 0xfffff;
    hexBack = hexBack ^ 0xfffff;

```

```

    int rText = ((hexText >> 16) & 0xFF); // Extract the RR byte  int gText = ((hexText
>> 8) & 0xFF); // Extract the GG

byte  int bText = ((hexText) & 0xFF);    // Extract the BB

byte  int rBack = ((hexBack >> 16) & 0xFF); // Extract the RR byte  int gBack =
((hexBack >> 8) & 0xFF); // Extract the GG

byte  int bBack = ((hexBack) & 0xFF);    // Extract the BB

byte

    myGLCD.setColor(rText, gText, bText);

    myGLCD.setBackColor(rBack,  gBack,  bBack);    myGLCD.printNumF(value,
pres_num, x , y);
}

///  

3 drawRectangle with resolution and color correction

void drawRectangle(long hexText, int x0, int y0, int x1, int
y1)
{
    x0 += 80;

    hexText = hexText ^ 0xfffff;

    int rText = ((hexText >> 16) & 0xFF); // Extract the RR byte  int gText = ((hexText
>> 8) & 0xFF); // Extract the GG

byte  int bText = ((hexText) & 0xFF);    // Extract the BB

byte

    myGLCD.setColor(rText, gText, bText);

    myGLCD.fillRect(x0, y0, x1, y1);
}

///  

4 drawRoundRect with resolution and color correction

void drawRoundRectangle(long hexText, int x0, int y0, int x1,

```

```

int y1)
{
    x0 += 80;

    hexText = hexText ^ 0xfffff;

    int rText = ((hexText >> 16) & 0xFF); // Extract the RR byte
    int gText = ((hexText >> 8) & 0xFF); // Extract the GG
    byte bText = ((hexText) & 0xFF); // Extract the BB

    byte

    myGLCD.setColor(rText, gText, bText);
    myGLCD.drawRoundRect(x0, y0, x1, y1);
}

// # 5 TESTING

void joystickFix()
{
    if (xPos >= 820) xFixedPos = 5;
    if (xPos < 820 && xPos >= 740) xFixedPos = 4;
    if (xPos < 740 && xPos >= 660) xFixedPos = 3;
    if (xPos < 660 && xPos >= 580) xFixedPos = 2;
    if (xPos < 580 && xPos >= 500) xFixedPos = 1;
    if (xPos < 500 && xPos >= 400) xFixedPos = 0;
    if (xPos < 400 && xPos >= 320) xFixedPos = -1;
    if (xPos < 320 && xPos >= 240) xFixedPos = -2;
    if (xPos < 240 && xPos >= 120) xFixedPos = -3;
    if (xPos < 120 && xPos >= 80) xFixedPos = -4;
}

```

```

if (xPos < 80 && xPos >= 0) xFixedPos = -5;
if (yPos >= 820) yFixedPos = 5;
if (yPos < 820 && yPos >= 740) yFixedPos = 4;
if (yPos < 740 && yPos >= 660) yFixedPos = 3;
if (yPos < 660 && yPos >= 580) yFixedPos = 2;
if (yPos < 580 && yPos >= 500) yFixedPos = 1;
if (yPos < 500 && yPos >= 400) yFixedPos = 0;
if (yPos < 400 && yPos >= 320) yFixedPos = -1;
if (yPos < 320 && yPos >= 240) yFixedPos = -2;
if (yPos < 240 && yPos >= 120) yFixedPos = -3;
if (yPos < 120 && yPos >= 80) yFixedPos = -4;
if (yPos < 80 && yPos >= 0) yFixedPos = -5;
}

void touchTest()
{
    int enable = 1;
    do {
        if (myTouch.dataAvailable()) {
            myTouch.read();    get_x = myTouch.getX();    myTouch.read();    get_y =
myTouch.getY();

            touch_x = get_x * 1.169 + 58.958;    touch_y = -get_y + 240;

            drawValue(get_x, 0xFFFFFFFF, 0x000000, 30, 1, 3);    drawText("-", 0xFFFFFFFF,
0x000000, 70, 1);

            drawValue(get_y, 0xFFFFFFFF, 0x000000, 90, 1, 3);
        }
    } while (enable);
}

```

```

        drawValue(touch_x, 0x00FF00, 0x000000, 30, 14, 3);        drawText("-",
0x00FF00, 0x000000, 70, 14);

        drawValue(touch_y, 0x00FF00, 0x000000, 90, 14, 3);

        myGLCD.drawPixel(touch_x, touch_y);

    }

} while (enable = 1);

}

void test()

{

    myGLCD.setFont(BigFont); drawText("TEST", 0xFFFFFF,
0x000000, 10, 5);

    joystickTest();

    myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("TESTING STEPPER
MOTOR...", 0xFF0000, 0x000000, 20, 140);

    delay(1000);

    speedM = 1000;

    stepTest(); delay(500); // One second delay

    speedM = 2000;

    stepTest(); delay(500); // One second delay

    speedM = 3000;

    stepTest(); delay(500); // One second delay

    testPallet();

    myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("FINALIZING...",
0xFF0000, 0x000000, 20, 200);

```

```

    delay(5000);
}
void testPallet() {
    myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("TESTING PALLET MOTOR...
", 0xFF0000, 0x000000, 20, 160);
    delay(1000);
    myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("TEST ", 0xFF0000,
0x000000, 260, 160);
    palletTurnPos(450);
    palletTurnPos(0);
    palletTurnPos(900);
    palletTurnPos(0);
    palletTurnPos(-450);
    palletTurnPos(0);
    palletTurnPos(-950);
    palletTurnPos(0);
    myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("STOP ", 0xFF0000,
0x000000, 260, 160);
    delay(500);
}
void stepTest()
{
    digitalWrite(dirPin, HIGH); // Enables the motor to move in
a particular direction

```

```

digitalWrite(resetPin, HIGH);
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("LEFT ", 0xFF0000,
0x000000, 260, 140);
do {
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delayMicroseconds(speedM);
    leftButtonState = digitalRead(leftStop);
}
while (leftButtonState == 0);
digitalWrite(resetPin, LOW);
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("STOP ", 0xFF0000,
0x000000, 260, 140); delay(1000); // One second delay
digitalWrite(resetPin, HIGH);
digitalWrite(dirPin, LOW);
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("RIGHT", 0xFF0000,
0x000000, 260, 140);
do {
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delayMicroseconds(speedM);
    rightButtonState = digitalRead(rightStop);
}
while (rightButtonState == 0);

```

```

digitalWrite(resetPin, LOW);
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("STOP ", 0xFF0000,
0x000000, 260, 140); delay(1000); // One second delay
}
void joystickTest()
{
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("TESTING JOYSTICK...",
0xFF0000, 0x000000, 20, 180);
do {
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("X", 0xFF0000,
0x000000, 200, 180);
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("Y", 0xFF0000,
0x000000, 260, 180);
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("fX", 0x00FF00,
0x000000, 190, 191);
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("fY", 0x00FF00,
0x000000, 250, 191);
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("A", 0x00FF00,
0x000000, 190, 205);
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("B", 0x00FF00,
0x000000, 230, 205);
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("R", 0xFF0000,
0x000000, 320, 180);
myGLCD.setFont(SmallFont); drawText("ENCODER", 0xFF0000,

```

```

0x000000, 270, 205);
    yPos = analogRead(xAxis);
    xPos = analogRead(yAxis);
    joystickFix();
    switchJoystickState = digitalRead(switchJoystick);
    if (xFixedPos < -1)
    {
        manualDriveStepperLEFT();
    }
    if (xFixedPos > 1)
    {
        manualDriveStepperRIGHT();
    }
    if (yFixedPos < -1)
    {
        manualDrivePalletLEFT();
    }
    if (yFixedPos > 1)
    {
        manualDrivePalletRIGHT();
    }
    myGLCD.setFont(SmallFont); drawValueFloat(xPos, 0xFF0000,
0x000000, 210, 180, 0);
    myGLCD.setFont(SmallFont); drawValueFloat(yPos, 0xFF0000,

```

```

0x000000, 270, 180, 0);
    myGLCD.setFont(SmallFont); drawValueFloat(xFixedPos,
0x00FF00, 0x000000, 210, 191, 0);
    myGLCD.setFont(SmallFont); drawValueFloat(yFixedPos,
0x00FF00, 0x000000, 270, 191, 0);
    myGLCD.setFont(SmallFont);
drawValueFloat(switchJoystickState, 0xFF0000, 0x000000, 330,
180, 0);
    myGLCD.setFont(SmallFont); drawValueFloat(encoder0Pos,
0xFF0000, 0x000000, 340, 205, 0);
    myGLCD.setFont(SmallFont);
drawValueFloat(digitalRead(encoder0A), 0x00FF00, 0x000000,
200, 205, 0);
    myGLCD.setFont(SmallFont);
drawValueFloat(digitalRead(encoder0B), 0x00FF00, 0x000000,
240, 205, 0);
}
while (switchJoystickState == 1);
}
void palletTurnPos(int pos)
{
    if (pos > encoder0Pos)
    { do {
        analogWrite(ccwPin, palletSpeed);

```

```

n = digitalRead(encoder0A);
if ((encoder0ALast == LOW) && (n == HIGH)) {
  if (digitalRead(encoder0B) == LOW) {
    encoder0Pos--;
  } else {
    encoder0Pos++;
  }
}
encoder0ALast = n;
} while (encoder0Pos < pos);
analogWrite(ccwPin, 0);
delay(200);
}
else
{
do {
  analogWrite(cwPin, palletSpeed);
  n = digitalRead(encoder0A);
  if ((encoder0ALast == LOW) && (n == HIGH)) {
    if (digitalRead(encoder0B) == LOW) {
      encoder0Pos--;
    } else {
      encoder0Pos++;
    }
  }
}

```

```

    }
    encoder0ALast = n;
} while (encoder0Pos > pos);
analogWrite(cwPin, 0);
delay(200);
}
}
void manualDriveStepperLEFT()
{
    digitalWrite(dirPin, HIGH); // Enables the motor to move in
a particular direction
    digitalWrite(resetPin, HIGH);
    speedM = 1000;
    do {
        xPos = analogRead(yAxis); joystickFix();
        digitalWrite(stepPin, HIGH);
        digitalWrite(stepPin, LOW);
        delayMicroseconds(speedM);
        leftButtonState = digitalRead(leftStop);
    }
    while (xFixedPos < -1 && leftButtonState == 0);
    digitalWrite(resetPin, LOW);
    delay(100);
}

```

```

void manualDriveStepperRIGHT()
{
  digitalWrite(dirPin, LOW); // Enables the motor to move in
  a particular direction
  digitalWrite(resetPin, HIGH);
  speedM = 1000;
  do {
    xPos = analogRead(yAxis); joystickFix();
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delayMicroseconds(speedM);
    rightButtonState = digitalRead(rightStop);
  }
  while (xFixedPos > 1 && rightButtonState == 0);
  digitalWrite(resetPin, LOW);
  delay(100);
}

void manualDrivePalletLEFT()
{
  do {
    yPos = analogRead(xAxis); joystickFix();
    analogWrite(ccwPin, 255);
  }
  while (yFixedPos < -1);
  analogWrite(ccwPin, 0);
}

```

```
}  
void manualDrivePalletRIGHT()  
{  
  do {  
    yPos = analogRead(xAxis); joystickFix();  
    analogWrite(cwPin, 255);  
  }  
  while (yFixedPos > 1);  
  analogWrite(cwPin, 0);  
}
```