



UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS “CARLOS RAFAEL RODRIGUEZ”

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO**

**Título: “Rediseño en el sistema de biorreacción de la instalación piloto para cultivo
intensivo de macroalgas propuesta por (Sosa, 2020)”**

Por

Autor: Ana Laura Aguila Duarte

Tutor: Eliané Arias Molina

Cienfuegos, 2022

DEDICATORIA

*A mi **mamá** María Gertrudis y mi **abuela** Clarita por ser mis guías y mi motor impulsor a lo largo de mi vida.*

AGRADECIMIENTOS

A mi abuela y mi mamá por su sacrificio, por su apoyo, por todo el esfuerzo, por indicarme siempre el buen camino, por ser una parte fundamental de mi vida y la mayor influencia en mi vocación como estudiante y futuro profesional, por ser mi inspiración y lo que más amo en la vida.

A mi amor Rolando por siempre apoyarme, estuviste a mi lado hasta en los momentos más tormentosos, siempre ayudándome y alentándome para continuar cuando parecía que me iba a rendir. No fue sencillo culminar con éxito en este proyecto sin ti a mi lado sin embargo me ayudaste hasta donde te era posible e incluso más. Te amo

A mi suegra Ismara por siempre preocuparse por mis estudios y apoyarme en lo que necesitara.

A mis hermanos por estar a mi lado en los buenos y malos momentos.

A mi abuelo Gabriel y a Capdevila por siempre estar ahí para mí y apoyarme.

A mi papá Daniel por preocuparse por mí y mis estudios aunque esté muy lejos y toda mi familia en general por todo el apoyo brindado.

A mi tutora Eliané por su gran apoyo en la confección de este trabajo.

A mis grandes amigos Yilian y Andy por apoyarme en estos años en mis estudios y en mi vida personal, porque juntos vivimos estos años de estrés y alegrías que constituyen una aventura imposible de borrar.

A mis compañeros de aula y de cuarto por las emociones compartidas en estos años de estudio.

Ya todos aquellos que de una forma u otra contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad.

Muchas gracias.

Síntesis

El proyecto de investigación presenta como principal objetivo realizar una propuesta de inversión de una instalación piloto para el cultivo intensivo de macroalgas marinas para estudios de biorremediación con el propósito de utilizar los gases de combustión residuales de la Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes como nutriente principal del proceso. La investigación se llevará a cabo mediante la recopilación de información a partir de la revisión de materiales vinculados al tema, búsqueda en internet, datos operacionales, etc. Como resultados de la investigación se pretende disponer de una tecnología para cultivo intensivo de macroalgas marinas; además se logrará un incremento de los ingresos por concepto de ventas de biomasa algal con beneficios en recursos financieros, generación de nuevas fuentes de materia prima para la industria y la alimentación.

Abstract

The main objective of the research project is to make a proposal for the investment of a pilot facility for the intensive cultivation of marine macroalgae for bioremediation studies with the purpose of using the residual flue gases of the Carlos Manuel de Cespedes Thermoelectric plant as the main nutrient of the process. The research will be carried out by collecting information from the review of materials related to the subject, internet search, operational data, etc. As a result of the research, it is intended to have a technology for the intensive cultivation of marine macroalgae; in addition, an increase in income from sales of algal biomass will be achieved with benefits in financial resources, generation of new sources of raw material for industry and feeding.

Índice

Abstract	5
Índice	6
Introducción	9
Justificación Del Estudio	9
Antecedentes De Este Tema:	11
Problema De Investigación	11
Hipótesis	12
Objetivo General	12
Objetivos Específicos	12
Capítulo 1: Marco Teórico De La Investigación	13
Introducción Al Capítulo	13
1.1. Aspectos Generales De Las Algas	13
1.2. Las Algas Pueden Clasificarse En Dos Grandes Grupos: Microalgas Y Macroalgas.	14
1.3. Especies De Algas Marinas En Cuba	16
1.4. Aplicaciones de las macroalgas y su biomasa	17
<i>1.4.1. Alimentación</i>	17
<i>1.4.2. Aplicaciones En La Agricultura</i>	18
<i>1.4.3. Ficocoloides, Gomas Industriales:</i>	18
<i>1.4.4. Aplicaciones En La Industria Farmacéutica Y Medicina</i>	18
<i>1.4.5. Aplicaciones En La Industria Energética</i>	19
<i>1.4.6. Cosmética</i>	19
<i>1.4.7. Tratamiento De Aguas Residuales</i>	20
1.5. Peculiaridades De La Ulva Lactuca	20
<i>1.5.1. Hábitat Natural De La Ulva Lactuca</i>	20
<i>1.5.2. Propiedades De La Ulva Lactuca</i>	21
1.6. Parámetros Que Influyen En El Cultivo Intensivo De Macroalgas.	22
<i>1.6.1. pH</i>	22
<i>1.6.2. Conductividad</i>	23
<i>1.6.3. Turbidez</i>	23

1.6.4. Luz solar	23
1.6.5. Temperatura	23
1.6.6. Nitrógeno Y Fósforo.....	24
1.6.7. CO ₂	25
1.7. Técnicas De Cultivo De Macroalgas.....	25
1.7.1. Sistemas Cultivo Intensivo De Macroalgas	27
1.8. Experiencias En El Cultivo Intensivo De Macroalgas.....	30
Conclusiones Parciales	32
Capítulo 2: Diseño de una planta piloto para el cultivo intensivo de macroalgas en la ETE “Carlos M. de Céspedes” de Cienfuegos.....	
Introducción Al Capítulo.	33
2.1 Metodología Para La Propuesta De Instalación	33
2.2 Descripción Del Proceso	35
2.3 Equipamiento Por Etapas	38
2.4 Datos Del Proceso A Escala De Laboratorio	39
2.5 Diseño y/o Selección Del Equipamiento Para La Instalación	41
2.5.1 Redimensionamiento Del Biorreactor Rectangular Para La Planta Piloto ...	41
2.5.2 Diseño De La Torre De Absorción De Gases.	43
2.5.3 Selección De Las Bombas De Frecuencia Variable Para La Sección De Mezclado (Para Agua Y Para La Recirculación De La Solución Salina).	43
2.5.4 Selección De Compresor De Aire	44
2.5.5 Selección De Las Válvulas	45
2.5.6 Diseño Del Tanque Para El Mezclado De Nutrientes	45
2.5.7 Diseño Del Tanque Colector De Agua Para La Recirculación.....	45
2.5.8 Selección Del Distribuidor De Aire	46
2.5.9 Selección Del Sistema De Tuberías	48
2.5.10 Selección Del Secadero Solar.	49
2.5.11 Sistemas Auxiliares	50
Conclusiones Parciales	51
Capítulo 3. Evaluación Económica	52

Introducción Al Capítulo.....	52
3.1 Cálculo Del Costo De Adquisición Del Equipamiento.....	52
3.2 Cálculo Del Costo De Inversión De La Planta	55
3.3 Estimación Del Costo De Producción.....	56
3.4 Ingresos De La Planta.....	57
3.5 Factibilidad Económica De La Planta.	58
Conclusiones Parciales	59
Conclusiones.....	60
Recomendaciones	61
Referencias Bibliográficas.....	62
ANEXOS.....	67

Introducción

Justificación Del Estudio

La emisión de Gases con Efecto Invernadero (GEI) que se producen como resultado de las diferentes actividades desarrolladas por el hombre, y que se acumulan en la atmósfera, están teniendo un efecto importante en el calentamiento global que induce y produce el cambio climático. El dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas contaminante nocivo para el medioambiente y el hombre, sus concentraciones van en aumento a medida que crecen las industrias químicas.

Existe la posibilidad de aprovechar de forma más beneficiosa y evitar los efectos negativos que puedan traer este contaminante, utilizándolo como materia prima de otros productos que impidan su expulsión a la atmósfera, lo cual nos conduce a las algas, estas tienen la capacidad de fijación del CO₂ a través de la fotosíntesis, reduciendo así las emisiones de CO₂, a la vez que producen una valiosa biomasa fuente de numerosos productos beneficiosos para el hombre como agar, alginatos y Carrageninas, para la industria de alimentos tanto para consumo humano como animal, en la industria farmacéutica y producción de biocombustibles renovables, entre otros. Por este motivo, el cultivo de algas y en especial el intensivo es una vía que está siendo estudiada para contribuir a la mitigación de la contaminación atmosférica provocada por los gases de efecto invernadero principalmente el CO₂.

El cultivo de algas (o también conocido como acuicultura, maricultura o ficocultura) es un sector que ha experimentado un gran auge en las últimas décadas, debido a que las algas presentan multitud de propiedades y compuestos muy interesantes que permiten su utilidad en diferentes ramas de la economía como la alimentación, químicos, cosméticos y demás productos farmacéuticos (Arias Molina, 2017b). Esto ha convertido a la acuicultura en un gran pilar económico y de gran importancia.

Las algas (Anexo 1) son un conjunto de vegetales talófitos cuyo ciclo biológico se desarrolla en el medio acuático. Están provistas de pigmentos que les permiten un modo de alimentación autótrofa y en alguna fase de su ciclo de vida permanecen fijadas al substrato marino, creando

biotopos naturales más o menos homogéneos. Las algas, además de su gran interés ecológico, son los principales productores primarios del planeta y un recurso económico natural que presenta una variedad de usos.

Las algas pueden clasificarse en dos grandes grupos: microalgas y macroalgas (Anexo2).

Las microalgas son organismos microscópicos, formados generalmente por una sola célula, y se les encuentra en muchos ambientes, general, aunque no exclusivamente acuáticos, de mar y agua dulce, y son parte esencial del plancton (específicamente el fitoplancton y es, por ejemplo, lo que le da el color verdoso al agua) (Arias Molina, 2017b).

Por su parte, las macroalgas y sobre todo las marinas son organismos de mayor tamaño, muy parecidas a las plantas terrestres. La comparación básica entre un alga y una planta muestra en su estructura o cuerpo, que en conjunto se conoce como “talo”, que se pueden distinguir tres partes: el rizoides o disco (similar a la raíz de una planta terrestre), el estipe (similar al tallo) y las láminas (similares a las hojas). En conjunto, estipe y láminas se llaman fronda o incluso frondes (que sería el follaje en la planta).

Las macroalgas poseen un alto valor en los ecosistemas litorales mundiales. Este valor no se basa solamente en sus funciones medioambientales de aseguramiento de estos ecosistemas marinos, sino que representa a su vez una fuente de riqueza natural para las poblaciones rurales pesqueras y en general para toda la industria transformadora de obtención de productos derivados de este amplio grupo de especies, como agares, alginatos, carrageninas, dietética, productos farmacológicos o para alimentación.

La provincia de Cienfuegos es una región altamente industrializada, en la cual se destacan la industria termoeléctrica, de refinación del petróleo y otros centros de gran importancia. Producto de la emisión de gases residuales de tales industrias, existe un considerable incremento de la contaminación atmosférica. Las algas utilizan el CO₂ en su metabolismo, contribuyendo con la regulación del ecosistema, por lo que actualmente se desarrolla un proyecto de investigaciones en esta región con vistas a mitigar la contaminación por el CO₂ residual industrial que se emite, a través del desarrollo de instalaciones de biorreactores para

el cultivo intensivo de la macroalga *Ulva Lactuca*, una fuente natural autóctona en la bahía de Cienfuegos.

El cultivo y explotación de algas marinas representan una actividad amigable al medio ambiente, ya que no genera desecho ni efluentes; aumenta, asimismo, la biodiversidad local al servir como sustrato y refugio a numerosas especies de peces e invertebrados y diversifica las actividades productivas tradicionales.

Antecedentes De Este Tema:

Tenemos el trabajo de diploma de (Delgado, 2015) que realizó una propuesta de inversión para una planta piloto para el cultivo intensivo de macroalgas marina *Ulva Lactuca* con el propósito de utilizar el CO₂ residual industrial como nutriente principal del proceso. Seleccionó y diseñó equipos del proceso para las etapas de filtración, biorreacción y secado de la biomasa, en la que definió dos opciones de filtro, un biorreactor rectangular y un circular y dos opciones de secaderos, siendo la propuesta seleccionada para la planta, el secadero solar de bandejas indirecto con circulación natural de aire, así como un sistema de instrumentación y control automático del proceso.

También (SOSA, 2020) realizó estudios para proponer un escalado, la planta piloto propuesta consta con un reactor de 10 m de largo por 3 metros de ancho, una altura de 0,0758 m, con un flujo de gases y aire de 0,05722 m³/s y 0,0631 m³/s respectivamente para el procesamiento de 304,174 g/día de biomasa algal.

El objetivo fundamental de este trabajo de investigación es realizar un nuevo escalado con nuevos recálculos de determinados equipos, a partir de nuevas condiciones de operación.

Atendiendo a lo expresado anteriormente, se formula el siguiente **Problema de Investigación:**

Problema De Investigación

Es necesario realizar un rediseño en el sistema de biorreacción de instalación piloto propuesta por (Sosa, 2020) según los intereses de la investigación, con el fin de aprovechar el CO₂ residual industrial y consecuentemente mitigar la contaminación atmosférica.

Hipótesis

Si se realiza un rediseño en el sistema de biorreacción de instalación piloto propuesta por (Sosa, 2020) según los intereses de la investigación se logrará un mejor aprovechamiento del CO₂ residual industrial y consecuentemente mitigar la contaminación atmosférica.

Objetivo General

Rediseñar el sistema de biorreacción de instalación piloto propuesta por (Sosa, 2020).

Objetivos Específicos

1. Establecer los fundamentos teóricos conceptuales que sustentan la investigación.
2. Rediseñar el sistema de biorreacción de instalación piloto propuesta por (Sosa, 2020).
3. Determinar la factibilidad técnico-económica de la instalación propuesta.

Capítulo 1: Marco Teórico De La Investigación

Introducción Al Capítulo

Fue el oxígeno generado por la fotosíntesis de las algas verde azules, y posteriormente por las algas eucariotas, más desarrolladas, el que formó nuestra atmósfera. En la actualidad, las algas realizan cerca de 50% de la fotosíntesis del planeta, lo que las sitúa en una posición decisiva para el mantenimiento de la vida en la Tierra.

El cultivo de algas (o también conocido como acuicultura, maricultura o ficocultura) es un sector que ha experimentado un gran auge en las últimas décadas, debido a que las algas presentan multitud de propiedades y compuestos muy interesantes que permiten su utilidad en diferentes ramas de la economía como la alimentación, químicos, cosméticos y demás productos farmacéuticos (Arias Molina, 2017b). Esto ha convertido a la acuicultura en un gran pilar económico y de gran importancia.

Las macroalgas usan la luz como fuente de energía y el agua de mar como medio de crecimiento, asimismo capturan el CO₂ disuelto y los nutrientes. Esta capacidad de biorremediación aumenta el valor potencial de la biomasa algal.

1.1. Aspectos Generales De Las Algas

Las algas son cada una de las plantas talofitas, unicelulares o pluricelulares, que viven de preferencia en el agua, tanto dulce como marina, y que, en general, están provistas de clorofila acompañada a veces de otros pigmentos de colores variados que la enmascaran.(Asale & Rae, 2022). En alguna fase de su ciclo de vida, permanecen fijadas al substrato marino. Las algas, además de su gran interés ecológico, son los principales productores primarios del planeta y un recurso económico natural que presenta una gran utilidad. Son capaces de elaborar sustancias orgánicas a partir de sustancias inorgánicas, transformando la energía luminosa que proviene del sol en energía química. En sus variedades, concentran todas las riquezas del mar: vitaminas, proteínas, aminoácidos, yodo, magnesio, potasio, hierro, selenio, zinc entre otros.

Por otra parte, las algas, al igual que las plantas terrestres, son grandes consumidoras de CO₂ en el proceso metabólico característico de las plantas y que son como ellas reguladores

naturales de este gas es nuestro sistema ecológico. Actualmente, las algas realizan cerca de 50% de la fotosíntesis del planeta, lo que las ubica en una posición crucial para el mantenimiento de la vida en la Tierra. Ese principio esencial, puede ser intensificado si se incrementa la masa verde y en ese sentido, las algas juegan un papel primordial si se logra además, captar de forma intensiva el CO₂ generado por la propia acción productiva del hombre, antes que escape a la atmósfera.

1.2. Las Algas Pueden Clasificarse En Dos Grandes Grupos: Microalgas Y Macroalgas.

Las microalgas son organismos microscópicos (2-200 μm) fotosintéticos, también son polifiléticos y eucariotas, formados generalmente por una sola célula, y se les encuentra en muchos ambientes. Están presentes en todos los cuerpos de agua, como lagos, mares y ríos y son parte esencial del plancton (específicamente el fitoplancton y es, por ejemplo, lo que le da el color verdoso al agua). Las microalgas no están supeditadas solo al agua. Se encuentran presentes en el suelo y la mayoría de los ambientes terrestres incluso en los más extremos, lo cual permite encontrarlas ampliamente distribuidas en la biosfera adaptadas a una gran cantidad de condiciones.

Las macroalgas y sobre todo las marinas son organismos macroscópicos, multicelulares en general, muy parecidas a las plantas terrestres. La comparación básica entre un alga y una planta muestra en su estructura o cuerpo, que en conjunto se conoce como “talo”, que se pueden distinguir tres partes: el rizoide o disco (similar a la raíz de una planta terrestre), el estipe (similar al tallo) y las láminas (similares a las hojas). En conjunto, estipe y láminas se llaman fronda o incluso frondes (que sería el follaje en la planta).

Se pueden clasificar las algas en tres amplios grupos basándose en su pigmentación: pardas, rojas y verdes, que reciben los nombres botánicos de feofíceas, rodofíceas y clorofíceas, respectivamente. Todas poseen clorofila y sus colores se deben a la presencia de diferentes pigmentos.

Feofíceas (algas pardas): La coloración parda, de tonalidad muy variable, se debe a la presencia de una gran cantidad de xantófilas, entre las que destacan fucoxantina y flavoxantina; además de la clorofila a poseen clorofila c; que muchas veces son enmascaradas

por la abundancia de los otros pigmentos. Son algas eucariotas, pluricelulares y morfológicamente muy diversas; se encuentran sólo en agua de mar y con formas que van desde algas filamentosas de estructura sencilla hasta algas que tienen tejidos diversificados por los que se realiza transporte de nutrientes dentro de la planta. En general, este tipo de algas es de crecimiento rápido y de gran tamaño, pudiendo alcanzar hasta las 200 m de largo. Son muy utilizadas como estabilizantes de emulsiones, como fertilizantes y para la obtención de yodo, entre otras (Elizondo Acosta & Freijo Torres, 2020).

Rodofíceas (algas rojas): El color pardo rojizo viene dado por la existencia de biliproteínas (ficoeritrina y ficocianina, principalmente), que contribuyen a enmascarar el color verde de la clorofila a y b; como material de reserva estas células acumulan almidón y su pared celular contiene, además de fibrillas de celulosa, galactanos sulfatados como el agar y los carragenanos. Son organismos eucarióticos presentes sobre todo en el medio marino, la mayoría son pluricelulares aunque también hay especímenes unicelulares; constituyen el grupo más diverso entre las algas bentónicas (Acosta Carbajal, 2018).

Clorofíceas (algas verdes): Es un grupo muy heterogéneo de algas con clorofila a y b, algunas xantófilas tales como luteína, violaxantina, neoxantina y enteroxantina; con esta composición de pigmentos el cuerpo del alga se ve verde, lo que permite una fácil identificación en terreno. Una característica biológica importante de este grupo es el almidón que almacenan como material de reserva en sus células. Morfológicamente son muy variadas, desde algas unicelulares a pluricelulares bastante complejas. Se pueden reproducir en forma alternada vegetativa, asexual o sexualmente. Son muy importantes porque constituyen el primer eslabón en la cadena alimenticia de su hábitat y contribuyen al aporte de oxígeno atmosférico. Son algas que han colonizado todos los ambientes, encontrándose el 90 % de las especies en agua dulce y el 10 % restante en aguas marinas; siendo en los mares fríos y templados donde se produce la mayor cantidad de especies (Ortiz Viedma, 2011).

Se considera que hay unas 15 800 especies de macroalgas repartidas entre: macroalgas rojas (6 000 especies), pardas (1 800), verdes (8 000 especies, de las cuales 1 000 son especies marinas y el resto de agua dulce) (Acosta Carbajal, 2018).

1.3. Especies De Algas Marinas En Cuba

En Cuba, las macroalgas marinas representan un recurso local abundante y disponible a lo largo de sus costas, caracterizado por una extensa diversidad de especies con más de 500 taxones infragenéricos descritos (Suárez et al., 2015). El empleo de las macroalgas en la industria cubana ha quedado restringido fundamentalmente a la extracción de ficocoloides (agar y carragenanos) y a estudios descriptivos sobre sus propiedades antioxidantes y farmacéuticas.

Estudios bromatológicos realizados en algas marinas cubanas reconocen el elevado contenido de carbohidratos (que constituyen aproximadamente el 50 % de su masa seca), minerales y en menor cantidad de fibra, proteínas y lípidos (Figura 1.1). La composición química de las macroalgas varía de acuerdo con la especie, sitio de cosecha condiciones ambientales como la estación del año, temperatura, salinidad, disponibilidad de luz y de nutrientes; además, según los procedimientos analíticos empleados para la extracción.

Figura 1.1

Composición química de las macroalgas.

Macroalgas	Carbohidratos (%)	Fibra cruda (%)	Proteínas (%)	Lípidos (%)	Cenizas (%)
Chlorophyta					
<i>Ulva fasciata</i> Delile ³	7,76-16,07	0,39-8,87	3,80-16,64	2,0-8,5	18,02-63,29
<i>Ulva lactuca</i> L. ⁴	49,2-68,9	7,6-27,4	5,9-18,38	nd	25,5-33,4
<i>Caulerpa paspaloides</i> (Bory) Greville ⁵	35,8	12,97	12,3	1,95	nd
Rhodophyta					
<i>Gracilaria blodgettii</i> Harvey ¹	53,4	4,57	9,60	0,02	32,40
<i>Laurencia intricata</i> J.V. Lamouroux ⁵	45,33	15,48	9,53	0,72	nd
<i>Euclima isiforme</i> (C. Agardh) J. Agardh ⁵	63,01	11,57	6,43	0,39	nd
<i>Bryothamnion triquetrum</i> (Gmelin) M.A. Howe ²	59,00	10,20	9,50	1,30	43,00
Phaeophyceae					
<i>Sargassum</i> spp. ⁵	53,02-67,92	11,42-12,15	6,89-7,61	0,06-0,95	nd
<i>Styopodium zonale</i> (J.V. Lamouroux) Papenfuss ⁵	66,84	17,77	6,74	1,84	nd
<i>Turbinaria turbinata</i> (L.) Kuntze ⁵	62,52	12,30	7,32	0,61	nd

Nota: Fuente: (Arias Molina, 2017)

Los carbohidratos presentes en las macroalgas son principalmente polisacáridos complejos y con frecuencia enlazados a iones, los cuales no se encuentran en las plantas superiores. Estos

polímeros naturales son abundantes en sus paredes celulares, esencialmente como sales de calcio, magnesio, potasio y sodio; otros son sulfatados y manifiestan amplio rango de bioactividad y aplicaciones industriales. Presentan una capacidad de intercambio iónico fuerte por lo que son considerados agentes quelantes. Los polisacáridos básicos de la pared celular en las algas verdes son los ulvanos, en las algas rojas los agaranos y carragenanos; mientras que las algas pardas presentan alginatos y fucoidanos. Después de los carbohidratos y minerales, las proteínas son el componente molecular más abundante en las macroalgas; las cuales poseen en su estructura los nueve aminoácidos esenciales. Otros constituyentes relevantes son las vitaminas (B, C, E y K), reguladores del crecimiento vegetal y pigmentos fotosintéticos responsables de las distintas coloraciones. (Espinosa-Antón et al., 2021)

1.4. Aplicaciones de las macroalgas y su biomasa

A pesar de ser un grupo bastante desconocido, las algas ofrecen un gran número de posibilidades en cuanto a su uso.

1.4.1. Alimentación

En sus inicios, las algas marinas se cosechaban para la elaboración de espesantes como el alginato, el agar y la carragenina, así como para su consumo directo. Las macroalgas son consideradas un alimento natural y saludable debido a sus múltiples beneficios. Son ricas en proteínas, vitaminas (sobre todo A, C y B-12), lípidos, fibras y minerales, especialmente los denominados micronutrientes, como el hierro, calcio, yodo, potasio y selenio. También son fuente de ácidos grasos naturales como los omega-3. Son consumidas de manera directa o como suplemento alimenticio, tanto en alimentación humana como animal. El consumo a nivel mundial se ha incrementado en los últimos años, siendo los países asiáticos, en especial China, Japón y Corea, los principales consumidores. Algunas de las razones podrían estar relacionadas con ciertos cambios en los hábitos alimenticios, como el aumento de la popularidad de las dietas veganas y vegetarianas y la gastronomía gourmet. (Camurati et al., 2019).

Algunos de los formatos de comercialización más usados corresponden al alga cruda deshidratada (rollos, picada, trozada, molida, harina), cocidas o ahumadas, entre otros. En particular en Asia oriental, se utilizan mucho en sopas, y algunas se usan para envolver el

sushi. Además, existen en el mercado numerosos alimentos y bebidas con sabor a alga (incluso helados), y se está estudiando el uso de las algas marinas como sustituto de la sal. El principal mercado de esos productos es Asia y el Pacífico, pero también crece el interés en Europa y América del Norte.

1.4.2. Aplicaciones En La Agricultura

En la agricultura, las macroalgas marinas muestran propiedades como fertilizantes naturales y bioestimulantes. Los extractos de algas son utilizados como reguladores de crecimiento, contienen altos niveles de hormonas vegetales, en particular citoquinonas, además de polisacáridos, aminoácidos y macro y micronutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Varios trabajos evidencian los efectos positivos en el crecimiento y la composición de ciertos cultivos debido a la aplicación de extractos preparados a partir de algas marinas. También hay evidencias de que el suministro de estos bioestimulantes influye positivamente en el estado general de la planta aumentando su resistencia a enfermedades y plagas (Camurati et al., 2019).

En el caso particular del uso de algas para la producción de compost, resulta interesante destacar que puede utilizarse material algal descartado de otros usos. La ventaja frente a otros compost es que la biomasa algal posee una baja relación C: N, lo que aumenta la calidad del fertilizante.

1.4.3. Ficocoloides, Gomas Industriales:

Son una amplia gama de productos que se extraen de las algas y cuya variable viscosidad los convierte en una serie de compuestos empleados por la industria cosmética, farmacéutica y alimentaria, no como alimentos, sino como aditivos. Estos productos se engloban en tres clases principales, agar, carraginosos y alginatos; los dos primeros se extraen de algas rojas, mientras que el último de algas pardas. (*Usos y aplicaciones de las algas*, 2022)

1.4.4. Aplicaciones En La Industria Farmacéutica Y Medicina

Las macroalgas son fuente de una gran variedad de moléculas y compuestos químicos denominados nutraceuticos, muy valorados por la industria farmacéutica y cosmética. Nutraceutico es un término derivado de las palabras “nutrición” y “farmacéutico”, y podría

definirse como “cualquier sustancia que sea un alimento o parte de un alimento y proporcione beneficios médicos o a la salud, incluyendo la prevención y el tratamiento de enfermedades”. (*Fim Rationale And Proposed Guidelines For The Nutraceutical Research & Education Act – NREA – Fimdefelice, 2022*).

Muchos trabajos han demostrado las excelentes propiedades antioxidantes, antitumorales, antibacteriales, anticancerígenas, entre otras, que poseen los extractos de diferentes algas. Numerosos estudios evidencian las propiedades nutraceuticas de las macroalgas argentinas. Debido a los altos niveles de proteínas de las algas, son fuente de péptidos bioactivos con interesantes funciones fisiológicas ejercen efectos antiinflamatorios en células inmunes

1.4.5. Aplicaciones En La Industria Energética

Las algas son una fuente prometedora para la producción de energía renovable, ya que pueden fijar las emisiones de gases de efecto invernadero, y principalmente porque no compiten con la producción de alimentos. En su trabajo, (Aitken et al., 2014) resaltan el reciente interés sobre la producción de biocombustible a partir de biomasa algal y sus potenciales beneficios ambientales. Los autores encontraron que el cultivo y procesamiento de algas marinas para la obtención de bioetanol y electricidad a partir del biogás producido por *Gracilaria chilensis* y *M. pyrifera* podría ser rentable. En la búsqueda de energías limpias y económicas, surge otra aplicación para las algas marinas: su uso en la fabricación de células solares para la producción de energía fotovoltaica basada en la obtención de energía eléctrica a partir de energía lumínica. Para ello, diferentes materiales denominados semiconductores se cubren con colorantes que incrementan la captación de luz. Los colorantes a base de clorofila obtenida a partir de algas marinas representan una alternativa económica y de fácil extracción.

1.4.6. Cosmética

Las macro algas marina exhiben una alta estabilidad frente a la oxidación, a pesar de estar expuestas a las condiciones de estrés marino, como la luz, fluctuaciones rápidas de temperatura, tensiones osmóticas y desecación. Estos organismos marinos sintetizan y acumulan compuestos para protegerse contra los altos niveles de radiación de energía ultravioleta, incluidos aminoácidos de tipo micosporina, carotenoides, xantofilas,

compuestos fenólicos, ácidos cinámicos, florotaninas, catequinas, bromofenoles, vitaminas E y C y polisacáridos (Ospina, Castro-Vargas, & ParadaAlfonso, 2017). Estas moléculas pueden capturar radicales libres, quelar metales prooxidantes, aceptar y donar electrones, alterar la peroxidación lipídica e inactivar especies reactivas de oxígeno y nitrógeno. Por lo tanto, pueden considerarse como fuentes promisorias de compuestos con actividad antioxidante. La actividad antioxidante es la capacidad de una sustancia para inhibir la degradación oxidativa (por ejemplo, la per oxidación lipídica), de tal manera que un antioxidante actúa, principalmente, gracias a su capacidad para reaccionar con radicales libres y, por lo tanto, recibe el nombre de antioxidante terminador de cadena. Los antioxidantes son compuestos de gran interés en la actualidad por sus benéficas implicaciones para la salud humana. Dado que en hoy existe un marcado interés en la búsqueda de antioxidantes de fuentes naturales, como las algas marinas(Jaramillo-Arango & Yepes-Osorio, 2019). En varios estudios algunas especies de macroalgas presentan actividad antioxidante, asociada a su contenido de fenoles totales los cuales son utilizados en la industria cosmética para aditivitos en la conservación de un producto.

1.4.7. Tratamiento De Aguas Residuales

La remoción de contaminantes de aguas superficiales, residuales y efluentes requiere de métodos sencillos y económicos, especialmente para aplicaciones a gran escala. Entre las numerosas técnicas utilizadas para la remoción de metales y metaloides de solución acuosa, la adsorción resulta muy efectiva y de bajo costo debido a que pueden usarse materiales económicos, incluso de desecho. Las algas representan un biomaterial muy abundante que ha sido empleado exitosamente en tareas de remediación (con biomasa viva o muerta).(Camurati et al., 2019)

1.5. Peculiaridades De La Ulva Lactuca

1.5.1. Hábitat Natural De La Ulva Lactuca

La macroalga Ulva Lactuca puede habitar rocas u otras algas, algunas veces flota sobre lodos de lagunas, crece en lugares expuestos al oleaje moderado, desde la zona intermareal hasta el infralitoral, se encuentra comúnmente en zonas contaminadas por materia orgánica. Tolera una amplia gama de salinidad y crece bien adherido a cualquier sustrato sólido.

La *Ulva Lactuca* no requiere de condiciones muy específicas: se encuentra en rocas expuestas a la luz, a diferentes niveles en aguas más o menos agitadas, si bien prefiere las aguas tranquilas del litoral Atlántico, la costa de Bretaña, el mar Negro y el océano Pacífico. Está compuesta de hojas translúcidas, su aspecto recuerda a las hojas de lechuga (de ahí su nombre común en español). Es un alga verde perenne que, gracias a un disco que actúa como una lapa, se adhiere a rocas, conchas y otras algas. Habita zonas poco profundas ricas en minerales. En las costas bretonas, cuando el mar retrocede forma inmensas alfombras verdes (Arias Molina, 2017b).

1.5.2. *Propiedades De La Ulva Lactuca*

Una de sus principales propiedades se debe al contenido en magnesio, entre el 2 y el 3%. Posee una magnífica proporción de vitaminas, entre ellas A (el doble que la col) y E --ambas antioxidantes-- y C (de 8 a 10 veces más que la naranja). Esta última activa la absorción del hierro. También es rica en calcio (de 10 a 20 veces más la leche), hierro (10 veces más que las espinacas) y magnesio (20 gr de ulva fresca aportan la dosis diaria de hierro recomendada). (*Ulva lactuca* / *Acuisur*, 2022)

Tabla 1.1

Composición de la Ulva Lactuca referido a peso seco.

Componentes	UM (mg/100g)
Nitrógeno	0,95-2,94
Fósforo	130,4-202,55
Potasio	792,7-2816,2
Sodio	674,77-1075,8
Calcio	858,0-880,0
Magnesio	3582,2-3785,3

Nota: Fuente (Arias Molina, 2017)

Tabla 1.2

Componentes orgánicos referidos a porcentaje peso seco.

Componentes	Rango
Proteína	5,9-18,38%
Fibra	7,6-27,4%

Cenizas	25,5-33,4%
Carbohidratos	49,2-68,9%
Materia orgánica/ Demanda Química de Oxígeno (DQO)	2726,0-3456 mg/L

Nota: Fuente (Arias Molina, 2017)

Es posible afirmar que esta especie de alga contiene 10 veces más vitamina C que una naranja, 2 veces más de vitamina A que una col, posee un alto porcentaje de hierro, de hecho 10 gramos de esta alga equivalen a 500 gramos de consumo de espinaca, 100 gramos de Ulva Lactuca corresponden a 2 veces más de hierro si se consumen 100 gramos de lenteja, posee además de yodo, pigmentos como los carotenoides y las xantofilas. Una vez desalinizada, su pH medio corresponde a 6,8. Es una materia orgánica rica en vitamina E, B y B12.(Acosta Carbajal, 2018)

1.6. Parámetros Que Influyen En El Cultivo Intensivo De Macroalgas.

Existen diferentes factores que son de vital importancia para cultivar macroalgas marinas.

1.6.1. pH

El pH está generalmente determinado por la cantidad de iones de hidrogeno que se encuentra libres en la columna del agua y a su vez está influenciado por los procesos biológicos dentro de los ambientes acuáticos. Donde el pH afecta directamente los procesos tanto químicos y biológicos del agua. La mayor parte de los organismos acuáticos requieren un rango de pH entre 6,5 y 8,5, en lo cual si se encuentran fuera de este rango suele haber una disminución en la diversidad, todo se da debido al estrés generado por los organismos no adaptados. Bajos valores de pH también pueden hacer que sustancias tóxicas se movilicen o se hagan disponibles para los vegetales marinos y animales. (Mesa Mirabal, 2018).

En las aguas el pH podría alcanzar valores superiores a 9 o 10 a causa de la captación de dióxido de carbono durante la fotosíntesis, pero no puede pasar un nivel de pH 11 como podría ser letal a las algas.

1.6.2. Conductividad

La conductividad es otro de los factores que afecta también la comunidad de las algas, este factor está relacionado directamente con el patrón de estratificación térmica de la columna de agua y con la permanencia de este período. En cierto casos el valor de la conductividad en el hipolimnio puede ser hasta seis veces mayor que en el epilimnio, lo cual hace un muestreo formado en toda la columna de agua. En los lugares trópicos las cantidades de la conductividad están compuestas con la naturaleza geoquímica del terreno, su afluencia varía fundamentalmente en la tiempo de lluvia, sequía y estado trófico (Rios Garcia, 2016)

1.6.3. Turbidez

Al igual de los otros factores es importante ya que se relaciona con las partículas en suspensión disueltas en la columna del agua, a su vez estas partículas impiden el paso de la luz solar y evitan que los vegetales acuáticos obtengan la luz solar que requieren para la realización de la fotosíntesis. Donde las plantas promoverán menos oxígeno y con ello bajarán los niveles de Oxígeno Disuelto Debido de estos procesos las plantas morirán más fácilmente y serán descompuestas por las bacterias en el agua, lo que reducirá los niveles de OD aún más, lo cual puede ser crítico para el ecosistema acuático, ya que su presencia y agrupación reducen el tipo de especies que ocurren de acuerdo con sus tolerancias y rangos de adaptación y por ende establecen toda la estructura y funcionamiento biótico de estos ecosistemas marinos (Mesa Mirabal, 2018)

1.6.4. Luz solar

La luz juega el papel significativo en la fijación de carbono, y la proporción de crecimiento. El carbono, el nitrógeno, el fosforoso son los elementos requerido para el crecimiento algal y junto con estos micronutrientes, algunos elementos como el manganeso, el cobalto, el azufre, hierro, el magnesio, el calcio, el potasio, etc. El suministro de nutrientes afecta la calidad de lípidos producida durante el cultivo de la biomasa. (Valdés, 2021)

1.6.5. Temperatura

Es un factor puntual para las distribuciones de las macroalgas, por lo que se pueden distinguir varias zonas geográficas de vegetación ya sean estas la polar, boreal, templada, tropical, etc.

De tal manera que el área la diversidad y las abundancias de especies está frecuentemente limitada en distancia por la temperatura de los meses más cálidos o más fríos.

La distribución de las temperaturas del agua de mar en la superficie no sólo va a depender de la latitud, sino también por otros factores como es el caso de las corrientes marinas ya sean estas la frías o cálidas que mantienen itinerarios constantes, por lo que estas pueden cambiar la estructura algal en las áreas en que ejercen su atribución. Dentro de un mismo hábitat o sector geográfico de las macroalgas, las variaciones térmicas, ya sea estas diarias o estacionales, son estas muchas más importantes para las algas que habitan en las zonas de oscilación de las mareas, ya que permanecen durante cierto tiempo expuestas a la temperatura de la atmósfera. Las que existen permanentemente sumergidas están sometidas a las diferentes variaciones de temperaturas muchos menores, debido a la inercia térmica del agua.

1.6.6. Nitrógeno Y Fósforo

Las algas precisan de una serie de nutrientes minerales indispensables para su desarrollo y reproducción como nitrógeno, hierro y fósforo, entre otros.

Los nutrientes presentan diferentes denominaciones de acuerdo a su concentración. Los macronutrientes son aquellos nutrientes que se encuentran en el agua de mar en concentraciones superiores a 0,02 mmol Kg-1. Los micronutrientes se encuentran en concentraciones desde 0,5 x 10⁻⁶ mmol Kg-1 (Mesa Mirabal, 2018).

El nitrógeno y el fósforo son los nutrientes más importantes en los estanques. De su concentración depende el crecimiento óptimo de la planta. Si hay poco fósforo y nitrógeno, habrá muy poco crecimiento, si hay mucho fósforo y nitrógeno existirá exceso de crecimiento, y durante la noche caerá el oxígeno disuelto (Mesa Mirabal, 2018).

La captación de compuestos nitrogenados puede estar condicionada por su disponibilidad y por factores ambientales del momento. El fósforo puede regular la utilización del carbono inorgánico del alga cultivada a diferentes niveles de CO₂. Un alto contenido de fósforo estimula la utilización de carbono inorgánico fotosintético y captura de nitrógeno. En condiciones de bajo contenido de fósforo, los tallos crecidos en un alto contenido de CO₂

tenían menor capacidad de utilización del carbono y mayor velocidad de captura de nitrógeno, comparado con los que crecían en CO₂ ambiental.

Estudios realizados indican que la concentración total de nitrógeno para crecimiento óptimo en media artificial es de 1-7 ppm y total de fósforos de 0,1-2,0ppm. Si nitrógeno se reduce por debajo de 0,2 ppm y fósforos por debajo de 0,05 ppm, hay inhibición de crecimiento de las algas. Hay efectos similar cuando la concentración de fósforos y nitrógeno pasar por encima de 20 ppm (Mesa Mirabal, 2018).

1.6.7. CO₂

Es un componente fundamental en el metabolismo de las macroalgas, razón que nos lleva a este estudio de utilizar los gases de combustión como fuente básica de CO₂ para el cultivo intensivo. Muchos estudios realizados sobre el cultivo de las algas han indicado que estas crecen más rápido en los ambientales de CO₂ elevado. La elevación en la concentración de este gas favorece el aumento del proceso de fotosíntesis y la producción de biomasa.

Hay efectos significantes en la producción de biomasa en el cultivo del alga marina roja, *Lomentaria articulata*, después tres semanas con concentración elevados de CO₂ desde 67 hasta 500% de la concentración ambiental. Al doble de esta concentración del CO₂ ambiental, se observada producción de biomasa mayores del 52 y 314%. Cultivó menta acuática durante cuatro semanas con concentración de 350 ppm y 3000 ppm de CO₂. Las plantas que han sido cultivados en concentración de CO₂ de 3000 ppm produjeron 220 % más de biomasa. El contenido en CO₂ total aumenta con la elevación de la temperatura, la salinidad, la precipitación del carbonato de calcio, y también con la respiración de los organismos. (Mesa Mirabal, 2018)

1.7. Técnicas De Cultivo De Macroalgas

El cultivo tradicional en ambientes marinos o hábitats costeros precisa el fijar las plantas a sustratos naturales y/o artificiales, implicando en la mayoría de los casos el control y cultivo del ciclo completo del alga. Otra estrategia de cultivo consiste en los sistemas ubicados en tierra bajo condiciones más controlables, como estanques y canales, por cuyos mayores costes y sofisticación se les ha denominado sistemas "capitalintensivo". El cultivo "capitalintensivo" de macroalgas presupone el uso de sistemas de crecimiento o producción

a nivel comercial, o al menos a escala piloto. El cultivo en estos sistemas tiene varias ventajas sobre los sistemas de cultivo en el mar, ya que la productividad por unidad de área es mayor, a la vez que los procesos de producción pueden ser controlados y mecanizados, disminuyendo su coste. Las macroalgas pueden ser cultivadas en laboratorios en ambientes artificiales, donde los aspectos fundamentales como el rendimiento, dado por el crecimiento y la producción de oxígeno, pueden ser controlados y manipulados. En cuanto a la forma de suministro de agua podemos caracterizar los sistemas como: tipo abierto, que es aquel al cual se le está suministrando constante mente el agua y tipo semicerrado, que es el que precisa de un cambio periódico de agua (Segura Pulido, 2013). También la posibilidad de crecer macroalgas flotando libremente en tanques, una de las consideraciones prácticas básicas es la de utilizar algas que puedan crecer vegetativamente de pequeños fragmentos. Al cultivar las algas flotando, además de eliminar el uso de sustratos de fijación, se evita depender de la reproducción sexual y/o asexual para obtener el inoculo, y tanto la siembra como la cosecha son más fáciles y susceptibles de mecanizar.

Las principales técnicas de cultivo de macroalgas pueden dividirse en dos grandes grupos: **ficocultura extensiva**, que se caracteriza por favorecer la extensión de las poblaciones naturales aumentando superficies de fijación y diseminando plántulas, con el objetivo de que las especies se naturalicen; y la **ficocultura intensiva**, donde todo el proceso de crecimiento y producción está controlado por el hombre. La ficocultura (también llamada acuicultura o maricultura) se puede realizar tanto en mar abierto como en tierra (Arias Molina, 2017b).

Ficocultura en mar: esta técnica de cultivo está ideada para especies capaces de reproducirse vegetativamente. Se realiza la siembra de fragmentos de alga encuerdas y piquetas en mar abierto. Es una técnica poco costosa pero que necesita una abundante mano de obra. Debe realizarse en zonas poco profundas y presenta varios inconvenientes, como la susceptibilidad a fenómenos naturales impredecibles o a patologías y pandemias. Ficocultura mixta planta-mar: se trata del cultivo de plántulas en laboratorio para su posterior trasplante a mar abierto fijándolas sobre un cabo portador. Está diseñada para especies de algas que no pueden reproducirse vegetativamente. Presenta los mismos inconvenientes que la ficocultura en mar.

Ficocultura en planta: todo el proceso de cultivo se realiza en tierra. Es un sistema de cultivo muy caro y con la necesidad de mano de obra muy cualificada. Tiene la ventaja de que todos los parámetros de cultivo están muy controlados y todos los procesos mecanizados. Actualmente se llevan a cabo sobre todo de manera experimental, dada su baja productividad, pero presenta unas perspectivas de futuro muy alentadoras para la acuicultura debido a que las algas poseen, como hemos comentado anteriormente, un potencial muy interesante como biofiltro en efluentes con un alto contenido de nutrientes.

Diferencias entre el desarrollo extensivo e intensivo

Los sistemas intensivos y extensivos pueden ser abiertos o cerrado. Los sistemas abiertos son los más abundantes y más antiguos. El cerrado presenta protección del medioambiente con objetivo de proteger al cultivo de la contaminación de otros organismos no deseados (algas competidores, parásitos, epifitos) o sustancias químicas que se pueden resultar tóxicas para las algas en cuestión.

1.7.1. Sistemas Cultivo Intensivo De Macroalgas

El sistema que más se emplea son tanques tipo pista. Es el sistema de cultivo más utilizado por su bajo coste de operación y alta eficacia de producción de superficie de cultivo útil, agitación por paletas e incorporación de CO₂ en aire por difusión. Los estanques se llenan con agua (10cm de profundidad) en la que diluyen los nutrientes y seguidamente se conecta el sistema de difusión de aire. El parámetro más importante para la configuración del tanque es la relación altura/ancho que, deberá ser más pequeña que 1. Para una circulación óptima se usarán soplantes axiales, mientras que la profundidad del agua no excederá de 1 m. Tanques más profundos obligarán al uso de compresores de aire más costosos, por lo cual, el aumento de la anchura del tanque (para mantener la relación altura/ancho más pequeña que 1, disminuye la eficiencia de la circulación del agua obtenida con una sola fila. Los estanques (o pistas) en un tamaño total de 1 ha se diseñan para dar una idea de equipamiento que se necesita y de los costos para la inversión y costos de operación, se diseñan 4 estanques, cada uno de 2500 m² con una longitud de 100 m y un ancho de 25 m. Los estanques se hacen de concreto con una altura de 0,6 m y la profundidad de agua es 0,3 m. El fondo es plano. Los estanques se disponen dos a dos con una distancia de 15 m para hacer simple el sistema de tuberías y el transporte de las macroalgas. El sistema de tuberías para agua salada se dispone

en el medio entre los 4 estanques. La distancia hasta la toma de agua es de hasta 400 m y la altura máxima sobre el nivel del mar es de 5 m. La rentabilidad del cultivo de las macroalgas en estanque de pista depende de una maximización de la producción de biomasa con un mínimo consumo de energía y mano de obra. Así, es crucial el control automático de un número de parámetros, tales como el flujo de agua y la adición de nutrientes y CO₂ (Kadar and Thomsen ,2010). Diferentes diseños de sistemas para el cultivo libre de macroalgas que abarcan un amplio rango de superficies-aéreas y volúmenes, y que van desde tanques de 0,2 m (90 L) hasta “raceways” de 60 m (12.000 L), han sido utilizados para evaluar datos de producción y capacidades de biofiltración de un amplio número de especies. Estas han sido ensayadas durante periodos de tiempo que en algunos casos superan los 15 años de cultivo continuado, como son los casos del alga rodofita *Hydropuntia cornea* (anteriormente *Gracilaria cornea*) y la clorofita *Ulva rigida*. (Segura Pulido, 2013)

La irradiación y la temperatura son parámetros muy importantes, aunque no críticos, en los sistemas de cultivo intensivo, ya que se trabaja bajo condiciones ambientales que de alguna manera pueden ser manipuladas, dependiendo en gran medida del diseño del sistema empleado y de las adaptaciones técnicas que se hagan en ellos. Sin embargo, la cantidad de nutrientes en el medio es uno de los factores que más pesa en la productividad de estos sistemas de cultivo.(Arias Molina, 2017)

Además del carbono inorgánico, es necesaria la adición de nitrógeno y fósforo, que son los elementos más importantes como macronutrientes esenciales para satisfacer los requerimientos fisiológicos de las algas. La adición de micronutrientes como elementos traza, ha recibido poca atención en los sistemas de cultivo intensivos descritos hasta la fecha, aunque su abastecimiento parece estar asegurado en sistemas de tipo abierto y semicerrado.

La adición de macro y micronutrientes se ha realizado empleando diversas estrategias para enriquecer los cultivos. Por un lado, la utilización de altas tasas de renovación recirculando aguas marinas a través de los sistemas de cultivo. También se han utilizado aguas oceánicas de hasta 60 m de profundidad ricas en nutrientes, aunque los costos asociados a su bombeo hasta la superficie los hacen sumamente restrictivos. Otra alternativa es la utilización de aguas residuales, que actualmente tienen un gran futuro en su aplicación a la maricultura algal en sistemas de biofiltración.

Aporte de CO₂

De forma general los sistemas de captura de CO₂ se pueden clasificar en tres grandes grupos: Postcombustión, Precombustión y Oxidación; de los cuales el primero es idóneo para su empleo como suministrador de carbono inorgánico en instalaciones de cultivo intensivo de algas.

Todos los proyectos convencionales de plantas de producción de algas parten de la base de disponer de gases de combustión, es decir, presuponen la existencia en las proximidades de las plantas de producción de algas de focos emisores de CO₂. El uso de gases industriales como fuente de CO₂ no sólo es necesario, sino que puede llegar a ser imperativo por los beneficios derivados de la eliminación de este tipo de contaminantes para la industria, y por tanto el beneficio económico y social que representa. Aunque el efecto estimulante sobre el crecimiento de algas por la adición de los gases de combustión al cultivo ya está demostrado, tiene los siguientes inconvenientes:

- Las industrias generalmente no están situadas en los lugares donde las condiciones climáticas y de construcción de la instalación son ideales para la ubicación de plantas de producción de algas.
- Los costos de transporte y distribución de los gases industriales hasta el sistema de cultivo serían pudieran ser elevados.
- La baja eficiencia en la captación del CO₂ procedente de gases de combustión.
- Necesidad de acondicionamiento previo de los gases.
- Posibilidad de exceso de acidificación, según la composición de gases.

A pesar de estos problemas, el aporte de CO₂ gratuito o con un costo mínimo resulta fundamental para la viabilidad energética y económica del proceso, así como el bajo consumo de energía, por lo que es imperativo disponer de fuentes de CO₂. En el caso de utilizar de gases de combustión se debe hacer un uso eficiente de dichos gases para que no supongan una reemisión a la atmósfera. La biomasa generada alcanza precios muy interesantes que permitirían posiblemente autofinanciar la inversión si se valora como un sistema integrado con tratamiento de gases de combustión en termoeléctricas u otras industrias contaminadoras. Existen avances encaminados a resolver los problemas antes citados. Hay compañías que han desarrollado procesos que permiten depurar los gases de

combustión, alcanzando hasta un 80% de eficiencia en el uso del CO₂ acoplado a la utilización de microorganismos fotosintéticos. Asimismo, el empleo de sistemas de transferencia de materia eficaces y la utilización de estrategias de control avanzado permiten reducir las pérdidas de CO₂ enormemente, hasta sólo el 5% del total del CO₂ inyectado en el reactor. Haciendo referencia específicamente a las macroalgas, el condicionante más importante para elegir la zona de cultivo es sin duda la disponibilidad de nutrientes, ya que la gran ventaja de las macroalgas frente a las microalgas es que, al ser bentónicas y/o macroscópicas, se les puede cambiar el medio de cultivo a medida que se desarrollan a muy bajo coste (o nulo, en el caso de efluentes por gravedad o en el propio mar). Pueden por ello introducirse en un medio que ya cuente con nutrientes y CO₂ disuelto, no se tiene obligatoriamente que enriquecer el agua en donde viven, simplemente se cambia. Esta diferencia es esencial, tanto por reducir en grado sumo los costos de cosechado como por permitir cultivarlas en ubicaciones de forma natural ricas en nutrientes y CO₂ disuelto. En la costa española las aguas más ricas en nutrientes son principalmente las que están bajo la influencia del fenómeno de afloramiento.

El control de variables físicas, químicas y biológicas, y sus interrelaciones en los sistemas de cultivo intensivo de macroalgas, han sido ampliamente estudiados a través del desarrollo hasta la escala comercial del cultivo de especies de interés industrial, principalmente de los géneros *Gracilaria* y *Chondrus*. La importancia de factores como el diseño del tanque, el bombeo y movimiento/agitación del agua/medio de cultivo, la irradiación, la temperatura, el aporte de nutrientes, el carbono inorgánico y su efecto sobre el pH del medio, la densidad (óptima y máxima) y la competición de especies (crecimiento de epífitos) muestran un efecto directo sobre el principal proceso fisiológico de las algas, la fotosíntesis, y por lo tanto, sobre los valores máximos de producción (g Peso Seco m⁻²d⁻¹) y eficiencia del sistema (% conversión de energía luminosa en biomasa). A mayor control de estas variables, mayor posibilidad de incrementar la producción y modificar la calidad de la biomasa obtenida. (Arias Molina, 2017)

1.8. Experiencias En El Cultivo Intensivo De Macroalgas

Existen estudios precedentes en nuestro país sobre el cultivo intensivo de macroalgas marinas.

(Pulido, 2013) realiza una propuesta de planta piloto donde utiliza un biorreactor tipo tanque cilíndrico, el cual se mantiene bajo las mismas condiciones del laboratorio como flujo de aire y agua de mar constantes, con un ciclo de renovación de 12 horas y un volumen efectivo de 6 litros. Utiliza un compresor que inyecta el aire a través de un aireador, colocado de forma circular. Para el desarrollo de la investigación selecciona la especie de alga *Ulva Lactuca*, más conocida como Lechuga de Mar. Utiliza dos tanques (A y B) con el objetivo de asegurar el flujo estacionario en la operación por gravedad. El tanque es cerrado herméticamente con el objetivo de mantener el volumen constante logrando la succión mediante el vacío.

(Delgado, 2015) realizó una propuesta de inversión para una planta piloto para el cultivo intensivo de macroalgas marina *Ulva Lactuca* con el propósito de utilizar el CO₂ residual industrial como nutriente principal del proceso. Seleccionó y diseñó equipos del proceso para las etapas de filtración, biorreacción y secado de la biomasa, en la que definió dos opciones de filtro, un biorreactor rectangular y un circular y dos opciones de secaderos, siendo la propuesta seleccionada para la planta, el secadero solar de bandejas indirecto con circulación natural de aire, así como un sistema de instrumentación y control automático del proceso.

Realizó un análisis de cuatro alternativas de inversión en la que quedó definida la alternativa que utiliza un filtro con tamiz parabólico.

También (García J. R., 2016) realizó estudios para proponer un diseño de la planta industrial de cultivo intensivo de macroalga. Diseñó los sistemas de biorreacción para un flujo de gases de 110544 kg/día. Seleccionó un enfriador de gases de combustión, cinco compresores, y siete secaderos solares de tipo invernadero.

(Arias Molina, 2017) también realizó estudios de este tipo. Diseñó el sistema de biorreacción tipo tanques abiertos rectangulares aireados enriquecidos con 3000 ppm de CO₂ con la exigencia de 75 biorreactores de 1000 m³ de capacidad. Incluyó en el diseño de la instalación los sistemas de acondicionamiento de gases y agua de mar para alcanzar el pH necesario. Según el resultado negativo del VAN indica que no es fiable efectuar dicha inversión.

(Aguilar, 2019) realizó el diseño del sistema para la planta mediante biorreactores tipo estanques abiertos circulares, aireados enriquecidos con 760 ppm de CO₂ y que exige 140 biorreactores de 100 m³ de capacidad.

Conclusiones Parciales

1. El cultivo intensivo de macroalgas constituye una alternativa eficaz para la reducción del impacto ambiental ocasionado por los gases de combustión de industrias contaminantes a la atmósfera.
2. Se indica que utilizar gases de combustión residuales industriales en cultivo de algas incrementa el rendimiento de producción de biomasa.
3. Existe suficiente información a escala de laboratorio con criterios para el escalado de la una planta de biorremediación de gases de combustión mediante el cultivo intensivo de macroalgas marinas a escala piloto.

CAPÍTULO 2: DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA EL CULTIVO INTENSIVO DE MACROALGAS EN LA ETE “CARLOS M. DE CÉSPEDES” DE CIENFUEGOS.

Introducción Al Capítulo.

Por ser una provincia industrializada, en Cienfuegos se emiten a la atmósfera grandes cantidades de gas contaminante, principalmente el CO₂; generado en los procesos de combustión de varias plantas químicas como ocurre en la Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes. Para disminuir las consecuencias que puede traer la contaminación por el CO₂ en dicha Termoeléctrica, se hace necesario buscar una eficaz solución tecnológica, basado en los sistemas biológicos, con técnicas más baratas. Por lo que mediante la instalación de una tecnología de cultivo de la macroalga marina *Ulva Lactuca*, abundantes en el litoral Sur, se logra la reducción de la concentración atmosférica de CO₂, además de utilizar la biomasa producida en la producción de biocombustibles y en la alimentación animal.

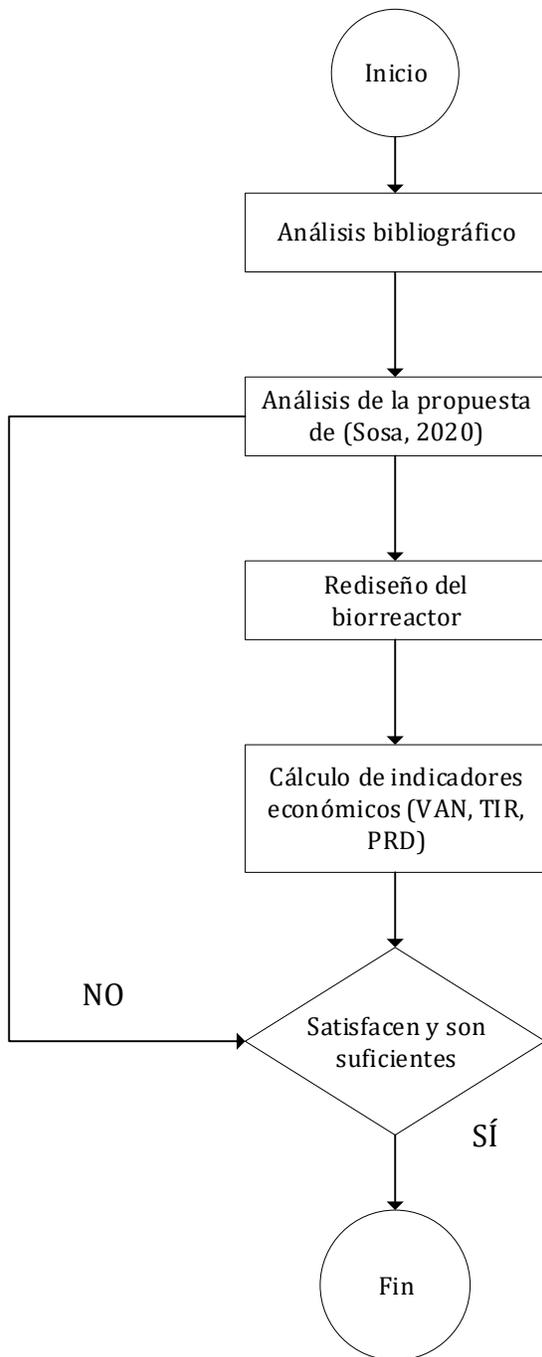
Para el cultivo de macroalgas se propone un biorreactor de tipo tanque rectangular RCCA, el cual se mantiene con un flujo de aire y agua de mar constante con un ciclo de renovación de 12 horas similar al llenado y vaciado de la bahía; donde al agua de mar procedente de los enfriaderos de la termoeléctrica se le añade un medio de cultivo (nutrientes), con el objetivo de lograr un mayor rendimiento de las algas en un menor período de tiempo.

Se utiliza un mini compresor que inyecta aire y gases de combustión provenientes de la torre de limpieza de gases, a través de un aireador (distribuidor de aire), colocado de forma circular, con un flujo constante y que constituye el medio de agitación.

2.1 Metodología Para La Propuesta De Instalación

Figura 2.1

Diagrama heurístico de la metodología para la propuesta de instalación



Nota: Fuente: Elaboración propia

La metodología de desarrollo de la investigación comienza con una búsqueda de literatura actualizada sobre instalaciones piloto para cultivo intensivo de macroalgas marinas.

Luego a partir del escalado realizado por (Sosa, 2020) se procede al redimensionamiento del equipamiento requerido de acuerdo a nuevas condiciones del sistema, principalmente nuevos reajustes al sistema de biorreacción.

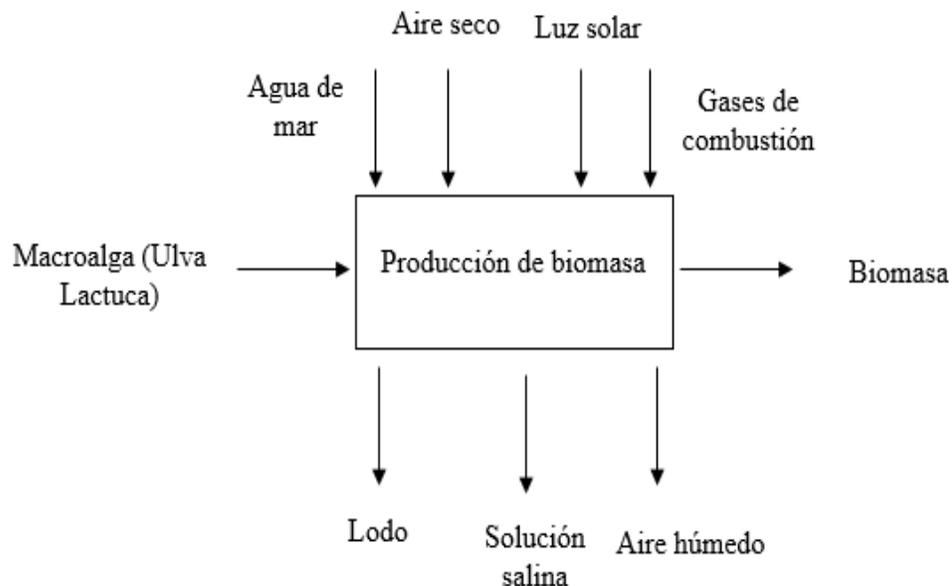
Una vez realizada la propuesta piloto se procede a realizar el análisis de factibilidad de la instalación propuesta aplicando el cálculo de los indicadores económicos de rentabilidad (VAN (valor actual neto), TIR (tasa interna de retorno) y PRD (período de recuperación al descontado)) si estos resultados resultan factibles se concluye la investigación, sino se realiza otra propuesta tecnológica.

2.2 Descripción Del Proceso

El objetivo principal del proceso es producir biomasa algal, mediante el aprovechamiento de la corriente de gases de combustión de la Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes.

Figura 2.2

Función total del proceso de obtención de biomasa algal.



Nota: Fuente: (Sosa, 2020)

El proceso consta de las siguientes etapas

1. Tratamiento de los gases de combustión
2. Preparación del medio de cultivo
3. Reacción bioquímica
4. Lavado de la biomasa
5. Secado

La primera etapa consiste en tratar los gases de combustión procedentes de la termoeléctrica. Este proceso se llevará a cabo en una torre de absorción con el objetivo de desulfurar y enfriar los gases hasta una temperatura aproximada de 30 grados.

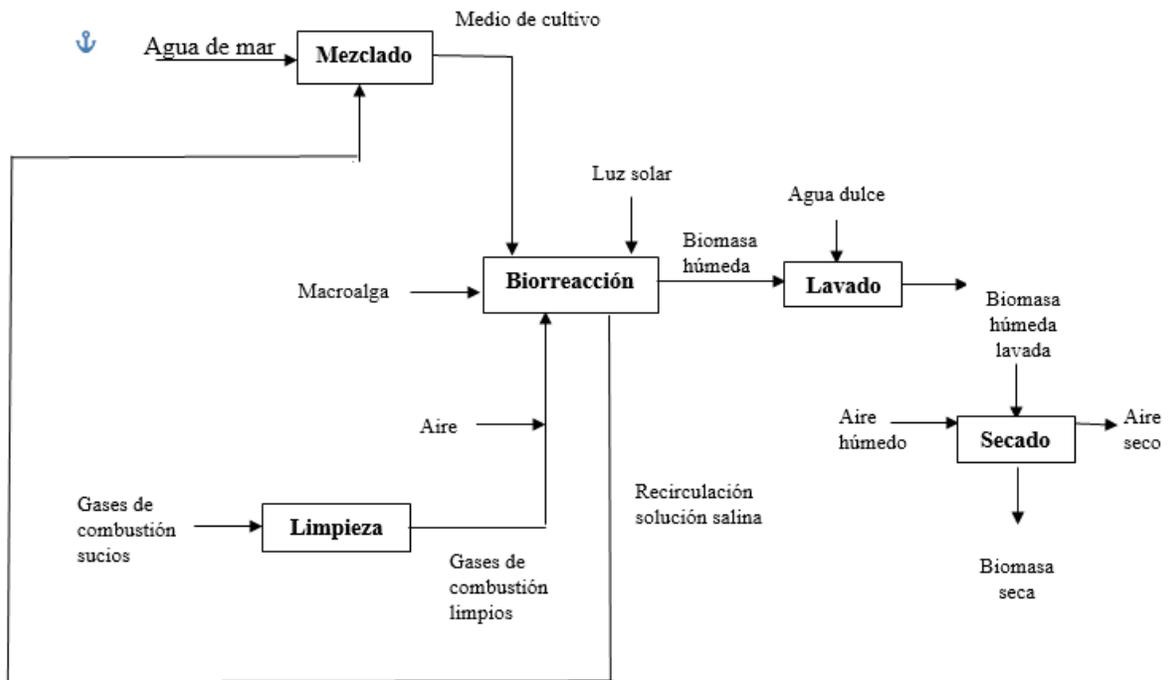
La segunda etapa de preparación del medio de cultivo, consiste en añadir al agua procedente de los enfriaderos los nutrientes que conformarán ese medio, lo cual permitirá un crecimiento de la biomasa algal. Con este medio de cultivo se pretende mantener la planta en un ambiente lo más parecido a su hábitat natural.

Seguidamente luego del tiempo necesario transcurrido y que el alga presente un tamaño adecuado, esta es lavada con agua dulce y llevada a un secadero para obtener la biomasa algal seca, para su posterior comercialización.

Existen dos variantes para el proceso, una de ellas consiste en conectar todas las etapas en serie y la otra consiste en la recirculación de la solución salina, con el objetivo de aprovechar los nutrientes que no fueron agotados completamente. La variante más adecuada es la de la recirculación salina puesto que contribuye a tener un ahorro de nutrientes en la producción y posteriormente contribuiría a un ahorro en la economía del proceso.

Figura 2.3

Acople en serie de las etapas del proceso con recirculación de la solución salina.

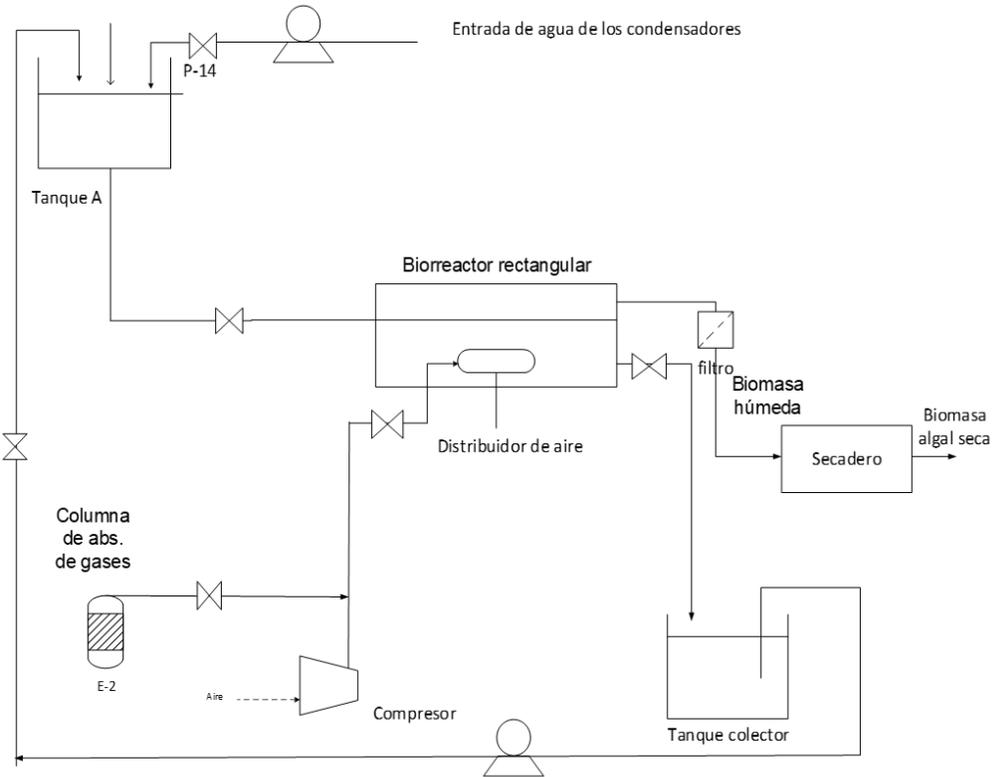


Nota: **Fuente:** (Sosa, 2020)

A continuación, se presenta la propuesta de diagrama de flujo.

Figura 2.4

Diagrama de flujo del proceso.



Nota: **Fuente:** (Sosa, 2020)

2.3 Equipamiento Por Etapas

Para las diferentes etapas del proceso se seleccionan diferentes equipos.

1. Etapa de limpieza de gases:

- Una columna de absorción de gases.
- Una válvula.

2. Etapa de mezclado:

- Un tanque para agua de mar y nutrientes de PVC.
- Dos bombas de frecuencia variable. (agua y recirculación de la solución salina).
- Tres válvulas.

3. Etapa de biorreacción:

- Un biorreactor tipo recipiente abierto de forma rectangular de PVC o de acrílico.
- Un compresor de aire.
- Un distribuidor de aire.
- Dos válvulas.
- Un tanque para la recirculación de agua.

4. Etapa de secado:

- Un secadero solar de bandeja o un secadero de bandeja convencional.

2.4 Datos Del Proceso A Escala De Laboratorio

Para la realización del escalado de la planta piloto, se parte de los datos obtenidos en el proceso a escala de laboratorio.

En el laboratorio se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 2.1

Resultados a escala de laboratorio

Largo (m)		0,4
Ancho (m)		0,198
Altura (m)	(relación A/L)	0,2
Área superficial [A] (m ²)		0,0792
Nivel de líquido experimental (m)		0,0758
Altura de sobrediseño experimental		0,1242

Volumen experimental [V] (m ³)		0,00600336
Tiempo espacial tao (h)		12
Relación (m ³ /m ²)	[V/Á]	0,0758
Relación (m ² /m ³)	[Á/V]	13,19261214
Flujo de agua (L/h)	Q=V/tao	0,50028
Concentración CO ₂ Laboratorio ppm		760
Flujo de gases de combustión (kg/s)		3,58683
Flujo másico de Aire kg/s		3,5803
Peso húmedo inicial del alga phi (g)		43,2
Peso húmedo final del alga phf (g)		72,8
Rendimiento húmedo de biomasa [RH] (%)	$R_H = \frac{P_{Hf} - P_{Hi}}{P_{Hi}}$	68,5185
Biomasa Húmeda Generada en 4 días (g)	$BHG = P_{Hf} - P_{Hi}$	29,6
Cantidad de días		4
Velocidad de crecimiento (g/día)		7,4
Peso de biomasa seca (g)		7,9
Humedad del alga en base húmeda Fracc		0,8915
Alga seca Fracc seca		0,1085

Total, de biomasa húmeda generada (g/día)		26,3879
Biomasa seca generada 4 días		3,2121
Biomasa seca generada 1 día		0,8030
IGBS (kg de alga/día*m ²)		10,1392
Humedad		64,9
humedad del alga en base húmeda Fracc	$\text{humedad en base húmeda} = \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de sol seco} + \text{humedad}}$	0,8915
humedad del alga en base seca Fracc	$\text{humedad en base seca} = \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de sol seco}}$	8,2152

2.5 Diseño y/o Selección Del Equipamiento Para La Instalación

Al analizar la propuesta de (Sosa, 2020) se llega a la conclusión que es necesario hacer un nuevo escalado para producir una cantidad de 2,14 kg de biomasa seca por día para satisfacer las necesidades económicas del proyecto. Al recalcular las condiciones de reajuste del proyecto se detecta que el balance de materiales sobre la base de 2,14 kg/d de biomasa seca no es posible producirla con el biorreactor diseñado por (Sosa, 2020) por lo cual se procede a rediseñarlo. Luego de realizar los balances correspondientes se obtiene que para producir 2,14 kg/d de biomasa seca se necesita producir alrededor de unos 18,55 kg/d de biomasa húmeda.

2.5.1 Redimensionamiento Del Biorreactor Rectangular Para La Planta Piloto

Datos:

Área Requerida (Ar) = ¿?

Altura del biorreactor (H) = 0.5 m

Volumen (V) = 92,75 m³

Biomasa húmeda (Bh) = ¿?

Biomasa del área de iluminación (Bai) = ¿?

Sobre la base de que se necesita obtener 18,55 kg/d de biomasa y a partir de estos datos es posible calcular el área del reactor por la ecuación (1).

$$V = Ar * H \quad (1)$$

$$Ar = \frac{V}{H} = \frac{92,75 \text{ m}^3}{0,5 \text{ m}} = 185,5 \text{ m}^2$$

Con el área del reactor es posible obtener la cantidad de biomasa húmeda del área de iluminación por día utilizando la ecuación 2.

$$Bai = Ar * 10,14 = 185,5 \text{ m}^2 * 10,14 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}} = 1880,97 \frac{\text{g}}{\text{d}} \quad (2)$$

Con esa área disponible que corresponde al área de iluminación se obtiene por un balance de materiales lo siguiente; tomando como base 1 día de producción y considerando modelo ideal (RD) para la fase sólida (biomasa).

$$Bh * 0,1014 = Bai \quad (3)$$

$$Bh = \frac{Bai}{0,1014} = \frac{1880,97}{0,1014} = 18539,15 \text{ g} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que el biorreactor de laboratorio tiene una relación de largo y ancho de (2/1) podemos calcular las dimensiones efectivas del biorreactor piloto tipo tanque.

$$\text{Área} = 185,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Largo} = 19,26 \text{ m}$$

$$\text{Ancho} = 9,63 \text{ m}$$

Finalmente se define que el biorreactor (Anexo 3) rectangular debe tener una altura de 0.5 m y un área de 185,5 m² para poder producir los 18,55 kg/d de biomasa húmeda requerida.

2.5.2 Diseño De La Torre De Absorción De Gases.

Dimensiones de la torre diseñada por (Sosa, 2020).

Parámetros	Ecuación	Resultados
Área (m ²)	$A = \frac{G_1}{G_{ope}}$	0,00034
Diámetro (m)	$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$	0,0208
Altura (m)	$Z = N_{TOG} \cdot H_{TOG}$	0,694
Presión (Pa)	$\Delta P_{total} = \Delta P_s + \Delta P_i$	6982.28

Para la planta piloto se necesita una torre con un diámetro de 0,0208 m, una altura de 0,684 m, y una caída de presión de 6985,28 Pa. Por lo que se selecciona (*Torre De Absorción Industrial*, 2022) (Anexo 4) que cumple con los requerimientos del proceso y un precio de 5 000 USD.

2.5.3 Selección De Las Bombas De Frecuencia Variable Para La Sección De Mezclado (Para Agua Y Para La Recirculación De La Solución Salina).

Existen variedades de bombas. En el uso de plantas a escala piloto, se destacan las bombas centrífugas, las de desplazamiento positivo y las de frecuencia variable. De estos tipos de bombas las que más se adecuan a esta etapa del proceso son las de frecuencia variable, pues estas son utilizadas para los diferentes flujos de agua y recirculación de la solución salina, sin dejar de trabajar en su punto de operación. Ambas bombas son iguales debido a que ambas secciones de tuberías con accesorios son iguales. Los resultados se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.3

Selección de las bombas para la sección de mezclado.

Parámetro	Ecuación	Resultado	Referencia
-----------	----------	-----------	------------

h_f	$h_f = \frac{fLV^2}{2Dg}$	22,3811566	(Rosabal, 2010)
h_{rl}	$h_{rl} = \frac{\sum kV^2}{2g}$	0,72741846	
h_{pt}	$h_{pt} = h_f + h_{rl}$	23,10857506	
H	$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\alpha \Delta V^2}{2g} + h_{pt}$	32,21399803	
Q	$Q = v \cdot A$	189,5 L/h	
N	$N = \rho g H Q / 1000 \eta$	0,02068311	

Con los datos de flujo y carga en (*Bomba Centrífuga De Frecuencia Variable*, 2022)(Anexo 5) se seleccionaron dos bombas de frecuencia variable modelo B1100-MLH20311-S20007, con una potencia de salida de 0.55 kW, con altura máxima de 37m y un caudal de 2000L/h

2.5.4 Selección De Compresor De Aire

Para el diseño del compresor de aire se buscó en internet compresores de flujo de aire de 3600 L/min y en catálogos se encontró el siguiente:

Tabla 2.4

Resultados de la selección del compresor de aire.

Criterios	Tipo de Equipo
	Screw Air Compressor WZS-50EVA
Máxima presión	145 PSI
Capacidad	6800 l/min
Costo	500 USD

Se selecciona este compresor Screw Air Compressor WZS-50EVA (Anexo 6) porque presenta una capacidad de flujo más cercana a la requerida (Anexo 7) (*Air Compressor For Industrial*, 2022).

2.5.5 Selección De Las Válvulas

Se seleccionan cuatro válvulas de globo para las secciones de la planta donde se necesita regular los flujos. Y se seleccionan dos válvulas de solenoide con un relay manual para la salida del aire en los casos como la recirculación de nutrientes y el bombeo de nutrientes al reactor.

2.5.6 Diseño Del Tanque Para El Mezclado De Nutrientes

Se selecciona 1 tanque de 2 274 litros de capacidad, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.5

Dimensionamiento de los tanques mezcladores.

<i>Datos</i>	<i>Ecuaciones</i>	<i>Resultados</i>	<i>Referencias</i>
Mmezcla=10228.6 kg $\rho_{mezcla}= 1027 \text{ kg/m}^3$ $V= 2,274 \text{ m}^3$ $H/D = 0,38$ H= 5% de sobrediseño	$D=[(4*V)/(\pi*H/D)]^{(1/3)}$ $h = 0.38.D$ $H = h + 0.05*h$	$D= 1,97 \text{ m}$ $h = 0,75 \text{ m}$ $H = 0,79 \text{ m}$	(Rosabal Vega & Garcel Puyans, 2010)

El tanque presenta un volumen de 2274 L y suponiendo que es de forma cilíndrica y que presenta una altura de 0,79 m el diámetro de este es de 1,97 m. Por lo tanto se selecciona (*Tanque De Almacenamiento De Agua De 3000 Litros, 2022*) con un precio de 220.00 USD.

2.5.7 Diseño Del Tanque Colector De Agua Para La Recirculación

Tabla 2.6

Dimensionamiento del tanque colector para recirculación

<i>Datos</i>	<i>Ecuaciones</i>	<i>Resultados</i>	<i>Referencias</i>
--------------	-------------------	-------------------	--------------------

Mmezcla=10228.6 kg $\rho_{mezcla}= 1027 \text{ kg/m}^3$ $V= 2,274 \text{ m}^3$ $H/D = 0,38$ H= 5% de sobrediseño	$D=[(4*V)/(\pi*H/D)]^{(1/3)}$ $h = 0.38.D$ $H = h + 0.05*h$	D= 1,97 m h = 0,75 m H = 0,79 m	(Rosabal Vega & Garcel Puyans, 2010)
--	---	---------------------------------------	--------------------------------------

El tanque presenta un volumen de 2 274 L y suponiendo que es de forma cilíndrica y que presenta una altura de 0,79 m el diámetro de este es de 1,97 m. Por lo que selecciona un tanque igual para coleccionar el agua de recirculación al tanque de mezclado de nutrientes.

2.5.8 Selección Del Distribuidor De Aire

Selección de tuberías

Para el cálculo del distribuidor de aire se parte primeramente de la selección de la tubería a utilizar. A partir de seleccionar una tubería de ½ in de diámetro exterior y con un diámetro interior de 0.622 in o 15.8 mm en la tabla 10 de (Rosabal Vega & Garcel Puyans, 2010) se calcula el área de esta y la velocidad del aire que pasa por ella. Los resultados se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.7

Dimensiones de la tubería

Parámetros	Unidad de medida.	Resultados.
Diámetro estandarizado	Dst (mm)	15,8
	Dst (m)	0,0158
Área total estandarizada	At (m ²)	0,000195967
Flujo de aire que se requiere	Q (l/min)	293,9511
	Q (m ³ /s)	0,004899185
Velocidad	V (m/s)	25

Diámetro del orificio

El diámetro del orificio se fija a través del criterio reportado por (Perry et al., 2001) a. Se establece que el diámetro del orificio d_0 debe estar en un rango de 3-12mm. Como la capacidad del biorreactor, que es donde será instalado el distribuidor de aire, es de (2274 l o 2,274 m³) se selecciona un diámetro de orificio de 12 mm o 0,012 m.

Número de orificios

Para el cálculo del número de orificios que debe tener el distribuidor se utiliza la siguiente metodología, donde:

$$D_{st} = \frac{0.95 \cdot (NC)^{\frac{1}{2}} \cdot D_0}{\left(\frac{\Delta v}{uh}\right)^{\frac{1}{4}}}$$

Despejando de la ecuación el número de orificios, esta queda.

$$N = \sqrt{\frac{D_{st} \left(\frac{\Delta v}{uh}\right)^{\frac{1}{4}}}{0.95 D_0}} \cdot C$$

Los términos de la ecuación y los resultados se explican en la tabla 2.8.

Tabla 2.8

Cálculo del número de orificios.

Parámetros	Unidad de medida.	Resultados.
Número de orificios	N	570
Coeficiente del orificio	C	0,63
Relación entre diámetros	d_0/D_{st}	0,7594
Reynolds	Re	31267,132
Diámetro del orificio	d_0 (m)	0,012
Diámetro del tubo	D_{st} (m)	0.0158
Velocidad	v (m/s)	25

Densidad	ρ (kg/m ³)	1,355
Viscosidad	μ (Pa.s)	0,000017124332
Velocidad promedio a través de los agujeros del rociador	Vh (m/s)	30
Diferencia entre las velocidades máxima y mínima a través de los agujeros del rociador	Δv	20
Velocidad máxima	m/s	40
Velocidad mínima	m/s	20
Mala distribución del flujo en porcentaje a través de los agujeros del rociador	$\Delta v/vh$	0,666667

Nota: El coeficiente del orificio C se busca en la figura 5.18 del Perry con el Reynolds y la relación entre diámetros.

Para el reactor se necesitan 15 tubos de 7,6 m de longitud ubicados a 0.20 m uno del otro, con 38 orificios cada uno, ubicados a 0.20 m, para un número total de orificios de 570.

2.5.9 Selección Del Sistema De Tuberías

Para determinar el dimensionamiento de las tuberías necesaria se calcula los diámetros interiores y exteriores para cada tipo de flujo, utilizando las velocidades recomendadas para fluidos impulsados, determinando así el área de la sección transversal necesaria para determinar lo diámetros de las mismas, los resultados se muestran en las tablas 2.9 y 2.10.

Tabla 2.9

Selección del sistema de tuberías para el fluido impulsado con bomba.

Parámetro	Datos	Ecuación	Resultados	Referencia
Velocidad (m/s)	1.5	$v = \frac{Q}{A}$	D = 1 in	(Pavlov, 1981) (Rosabal, 2010)
Flujo (m ³ /h)	2,274	$A = \frac{\pi * D^2}{4}$		

		$D = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot V}}$		
--	--	--	--	--

- Para 2,274 m³/h el diámetro interior estandarizado es de 1 in.

Tabla 2.10

Selección del sistema de tuberías para el fluido impulsado por gravedad.

Parámetro	Datos	Ecuación	Resultados	Referencia
Velocidad (m/s)	1.5	$v = \frac{Q}{A}$	D = 1/8 in	(Pavlov, 1981)
Flujo (m ³ /h)	0,1895	$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$		(Rosabal, 2010)
		$D = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot V}}$		

- Para 0,1895 m³/h el diámetro interior estandarizado de 1/8 in.

2.5.10 Selección Del Secadero Solar.

Aprovechar la energía proveniente de fuentes renovables constituye en una alternativa viable para reducir el impacto ambiental a través del uso de combustibles fósiles. El sol es una fuente de energía gratuita, disponible y renovable. Su utilización resulta económica frente a las fuentes tradicionales.

El secadero solar es un dispositivo tecnológico alternativo para el secado de frutas, hortalizas, plantas aromáticas, etc. Entre los diferentes tipos de secadero solar, están, el tipo carpa, tipo túnel y tipo armario.

Para la planta piloto se ha seleccionado el secadero solar tipo túnel (Anexo 9). Consiste en un túnel horizontal elevado con una base rígida de hierro y una cobertura transparente de lámina de polietileno de larga duración, igual que el tipo carpa. El aire circula en forma horizontal a través de todo el túnel, ingresa por un extremo y sale por el otro, generalmente con la ayuda de un ventilador eléctrico. Las bandejas de secado son removibles y se pueden estirar lateralmente como los cajones de una cómoda. Por la altura relativamente grande de

las bandejas es posible secar también productos que ocupan mucho volumen, tales como hierbas o flores. La entrada y la salida del aire están protegidas con una malla mosquitero para evitar el ingreso de insectos. Para un mejor aprovechamiento del secadero, se puede agregar un sistema de calefacción auxiliar (Conocimientosweb.net, 2014).

2.5.11 Sistemas Auxiliares

Para el diseño de la planta química es de vital importancia el reconocimiento de los sistemas auxiliares, que garantizaran la marcha eficiente del proceso. Reconocerlo e identificarlo según las características del mismo, garantiza el buen funcionamiento de los mismos y su contribución al proceso.

Los principales sistemas auxiliares en el proceso son:

- Sistema de Almacenaje
- Sistema de Instrumentación y control
- Sistema de seguridad e higiene
- Sistema de Mantenimiento

Sistema de Almacenaje: En el proceso solamente es necesario almacenar a la hora de entregar el producto seco. Es un sistema muy importante, ya que cualquier proceso le brinda seguridad, continuidad y fiabilidad.

Sistema de Transporte: Como el proceso es continuo, el sistema de transporte consiste en tuberías que conectan una etapa con otra.

Sistema de Instrumentación – Control y Sistema de seguridad e higiene: Otro de los sistemas de mayor importancia en el proceso es el de instrumentación y control y este a su vez se encuentra estrechamente relacionado con el de protección e higiene.

Sistema de Mantenimiento: El mantenimiento de la planta, a pesar de ser una mini planta o planta piloto, es necesario, puesto a que previene fallas que puedan afectar la producción en el transcurso del proceso. La planificación y programación de los mantenimientos tanto

preventivos como planificados, por parte del sistema de mantenimiento debe ser de estricto cumplimiento, para evitar diferentes problemas de fallas con el equipamiento que se puedan presentar.

Conclusiones Parciales

1. A partir de índices de diseño y operación alcanzados de los estudios del cultivo intensivo de macroalgas en el laboratorio se desarrolló el procedimiento de una planta piloto para la producción de 2,14 g/d de biomasa seca.
2. El reactor diseñado a escala piloto tiene una superficie de iluminación de 185,5 m² en igualdad de proporciones de biorreactor de laboratorio utilizado.
3. El sistema de bombeo del proceso está constituido por dos bombas de frecuencia variable, una para llevar el agua hasta los tanques de nutrientes y la otra para la etapa de recirculación de la solución salina.

Capítulo 3. Evaluación Económica

Introducción Al Capítulo.

La estimación del costo de inversión de la planta se realiza a partir de la información de los costos del equipamiento en distintos catálogos y páginas web revisadas en internet.

3.1 Cálculo Del Costo De Adquisición Del Equipamiento.

- Tanques de almacenamiento.

La capacidad requerida de los tanques es de 3 000 litros.

Tabla 3.1

Cálculo del costo de los tanques

Cantidad	Costo actualizado (\$)	Costo total (\$)
2	500	1 000

- Biorreactor rectangular.

Para la estimación del costo del biorreactor rectangular con una capacidad requerida de 92 750 litros se realiza una búsqueda en internet donde encontramos la oferta de un tanque de fibra de vidrio y resina por el precio de \$ 2 800,00

Tabla 3.2

Cálculo del costo del biorreactor rectangular

Cantidad	Costo actualizado (\$)	Costo total (\$)
1	3 000	3 000

- Bomba de frecuencia variable.

Los costos de las bombas de frecuencia variable seleccionadas son de \$ 300.00, por lo que el costo de las dos bombas es de \$ 600.00.

- Compresor de aire.

El costo del compresor seleccionado es de \$ 600.00.

- Distribuidor de aire

El distribuidor de aire tiene un costo de \$ 66.80.

- Columna de absorción

La columna de absorción tiene un costo de \$ 3 000.00.

- Secadero solar

El secadero solar tipo túnel seleccionado tiene un costo de \$ 5 000.00.

Cálculo del costo de inversión de los accesorios y tuberías.

- Válvulas

Los resultados del costo de las válvulas se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3

Cálculo del costo de las válvulas.

Tipo de válvula	Cantidad	Costo (\$)	Referencia	Costo total (\$)
Válvulas de solenoide con relay de (1/4in) de diámetro	1	12.75	(Sosa, 2020)	12.75
Válvulas de solenoide con relay de (1/8in) de diámetro	1	9.36	(Sosa, 2020)	9.36
Válvulas de globo (1/2)	1	79.20	(Sosa, 2020)	79.20
Válvulas de globo (1/4)	2	28.99	(Sosa, 2020)	57.98
Válvulas de globo (1/8)	1	55	(Sosa, 2020)	55

Total	8			214.02
-------	---	--	--	--------

- Medidores de flujo

El resultado del costo de un rotámetro para aire es \$ 159.00 (3 serían \$ 477.00)(*Medidor De Flujo De Masa De Gas De Aire De Nitrógeno Digital, 2022*) y para agua es de 160 USD (2 serían \$ 320.00)(*Medidor De Flujo De Turbina De Agua De Acero, 2022*)

- Regulador PLC

El costo de un regulador PLC es de \$ 322.00 (*Controlador Lógico Programable, 2022*)

- Peachímetro

El costo del peachímetro es de \$ 77.00, como se necesitan 2 el costo total es de \$ 154.00 (*Controlador De Medidor De Ph Automático Industrial, 2022*)

- Sensores de gases de combustión

El costo de los sensores de gases de combustión es de \$ 101.20 (2 serían \$ 202.40)(*Asair-medidor De Flujo Másico De Gas, 2022*).

- Regulador de gases

El precio de un regulador es de \$ 100.50 (2 serían \$ 203.00)(*Regulador De Presión De Gas Y Aire Natural, 2022*).

- Tuberías

Tuberías de la sección de compresión de aire (1/2 in).

Tubería de la sección de flujo de nutrientes al reactor por gravedad (1/8 in).

Resto de la tubería de la planta (1/4 in).

El costo de los sistemas de tubería según (Piters, 1976) es el 0.31% del costo de inversión del equipamiento.

3.2 Cálculo Del Costo De Inversión De La Planta

La estimación del costo de inversión de la planta es la suma de los costos de los equipos hallados anteriormente, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4

Costo de adquisición del equipamiento.

Equipos	No Equipos	Costo total (\$)
Tanques	2	440.00
Bomba de frecuencia variable	2	600.00
Biorreactor rectangular	1	3000.00
Compresor de aire	2	1200.00
Columna de absorción	1	3000.00
Distribuidor de aire	1	66.80
Secadero solar tipo túnel	1	5000.00
Costo total equipamiento		13 306.80

Para la estimación del costo total de inversión (CTI) se utiliza el método del porcentaje.

$$\text{CTI} = \text{Costo Fijo de Inversión (CFI)} + \text{Inversión de Trabajo (I}_{\text{Trabajo}})$$

$$I_{\text{Trabajo}} = 15 \% \text{ CTI}$$

$$\text{Capital fijo de inversión (CFI)} = \text{Costos directos (CD)} + \text{Costos indirectos (CI)}$$

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5

Cálculo del costo total de inversión.

Costo directo		
Aspecto	% de CE	Costo (\$)
Costo del equipamiento (CE)		13 306.80
Costo de tuberías y accesorios	31	4 125.11

Instrumentación y control	26	3 459.77
Instalaciones eléctricas	10	1 330.68
Costo de edificación	29	3 858.97
Servicios y facilidades	55	7 318.74
Total de costos directos (CD)		33 400.07
Costo indirecto		
Aspecto	%	Costo (\$)
Ing. y supervisión	32	3 340.01
Gastos de contratación	19	2 338.00
Contingencias	37	3 006.01
Total costo indirecto (CI)		8 684.02
Costo fijo de inversión	CD+CI	42 084.09
Inversión de trabajo	75	9 980.10
Costo total de inversión		52 064.19

Nota: Elaboración propia

3.3 Estimación Del Costo De Producción

La Tabla 3.6 muestra el resultado del costo de producción. La mano de obra se calcula basado en el gasto financiero por concepto de salario medio mensual de un operador; el servicio principal considerado es el consumo de corriente eléctrica, se asume un % del costo de inversión para gastos de mantenimiento, reparaciones y mano de obra; la depreciación se determina con la relación costo de inversión/vida útil, considerando 8 años de vida útil de la estación piloto y los costos de distribución y venta se determinaron considerando que representan un % del costo de producción (Piters, 1976).

Tabla 3.6

Cálculo del costo total de producción.

Denominación	factor	Bases	Costo \$/año
Materias primas (MP)			800.00
Utilidades (U)			1 000.00
Mano de Obra (MO)			1 500.00
Supervisión (S)	0,15	MO	225.00
Mantenimiento (M)	0,02	(CFI)	841.68
Suministro (Su)	0,05	CFI	2 104.20
Gastos de laboratorio (GL)	0,07	MO	105.00
Total, CDP			6 575.89
Cargos fijos (FC)			
Depreciación (D)			6 251.00
Seguros, Impuestos (SI)	0,02	CFI	841.68
Total, FC			7 092.68
Gastos generales (GG)			
Distribución	0,02	CTP	131.52
Desarrollo e investigación	0,05	CTP	328.79
Financiación	0,15	CTP	986.38
Total GG			1 446.69
Costo de producción total			15 115.26

Nota: Elaboración propia

3.4 Ingresos De La Planta.

Tabla 3.7

Ingresos de la planta.

Ingresos por ahorro

Ahorro	Precio \$/kg	Cantidad \$/ año	Costo \$/año
Ahorro por emisiones de CO2 tratadas	10	440,64	4 406.4
Ingresos por ventas			
Productos	Precio \$/kg	Cantidad \$/ año	Costo \$/año
Biomasa para la producción de biocombustibles	5,8	750	4 350
Biomasa para consumo animal	40	750	30 000
Total de Ingresos			34 350

Nota: Elaboración propia

3.5 Factibilidad Económica De La Planta.

Tabla 3.8

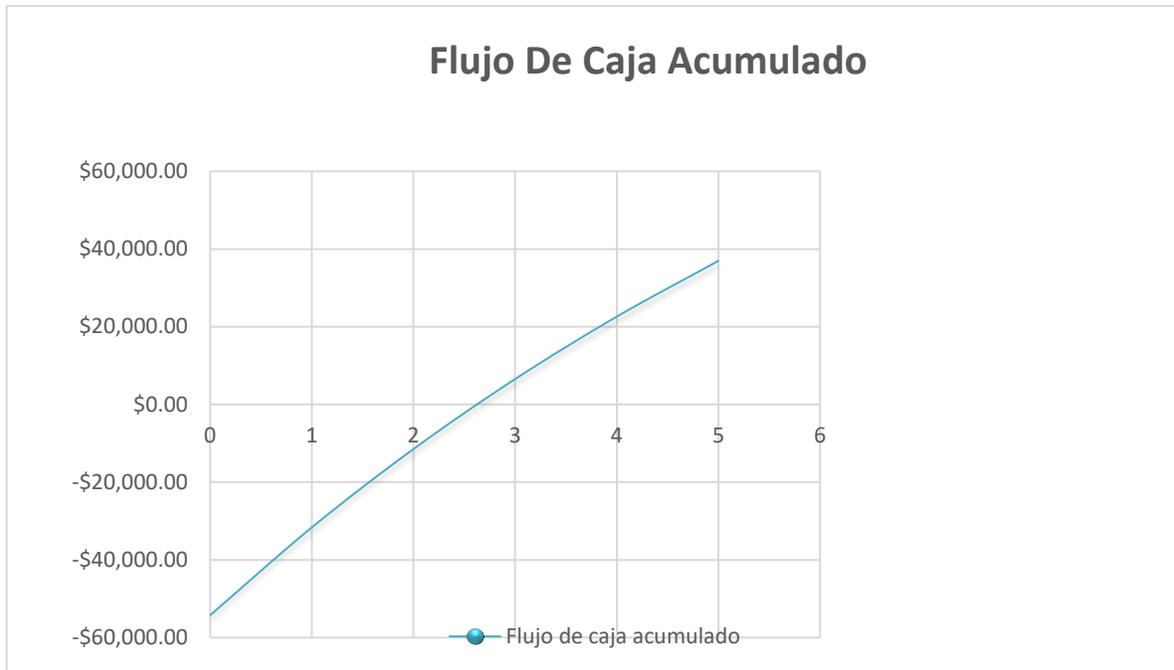
Cálculo de los valores dinámicos de factibilidad.

Valor Actual Neto VAN	\$ 35 541.24
Tasa Interna de Retorno TIR	40%

Nota: Elaboración propia

Figura 3.1

Grafico PRD del proyecto



Nota: Elaboración propia

La planta se recuperaría en un período de 2,5.

Conclusiones Parciales

1. La planta tiene un costo de inversión total de \$52 064.19 y un costo de producción total de \$ 15 115.26.
2. El valor actual neto de la instalación es de \$ 35 541.24, con una Tasa Interna de Retorno del 40% y un PRD de 2,5 años de acuerdo con la información disponible actual del precio de venta de 5,8 \$/kg y 40 \$/kg de biomasa seca de algas destinada a la producción de biocombustibles y de proteínas para la alimentación animal respectivamente.

Conclusiones

1. Un sistema de cultivo intensivo en estanques es la mejor alternativa para ser utilizada a escala piloto que permita el análisis de la influencia de las distintas variables que influyen en el proceso.
2. Se realizó el rediseño de la etapa de biorreacción. La planta piloto consta con un reactor de 19,26 m de largo por 9,63 metros de ancho, una altura de 0,5 m, para el procesamiento de 18,85 kg/día de biomasa algal.
3. La propuesta de instalación piloto es factible y viable con un costo de inversión de \$ 52 064.19; con un VAN de \$ 35 541.24 una TIR de 40 % y un PRD de 2,5 años.

Recomendaciones

1. Impulsar nuevas investigaciones que analicen el proceso con otros tipos de macroalgas.
2. Diseñar el secadero seleccionado para la etapa de secado.

Referencias Bibliográficas

- Acosta Carbajal, E. (2018). *Evaluación de secador solar para macroalgas marinas* [PhD Thesis]. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Facultad de Química.
- Air Compressor For Industrial*. (2022). alibaba.com. https://www.alibaba.com/product-detail/CE-ISO-Factory-Price-75KW_1600510982643.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.221b4e363OOLi1&s=p
- Aitken, D., Bulboa, C., Godoy-Faundez, A., Turrion-Gomez, J. L., & Antizar-Ladislao, B. (2014). Life cycle assessment of macroalgae cultivation and processing for biofuel production. *Journal of Cleaner production*, 75, 45-56.
- Arias Molina, E. (2017b). *Estudio prospectivo de instalaciones industriales para cultivo intensivo de macroalgas marinas en Cuba* [PhD Thesis]. Universidad Central Marta Abreus de Las Villas. Facultad de Química.
- Asair-medidor De Flujo Másico De Gas*. (2022). https://spanish.alibaba.com/p-detail/2021-1600348321390.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.6ced3247dDxO1f&s=p
- Asale, R.-, & Rae. (2022). Alga | Diccionario de la lengua española. «Diccionario de la lengua española» - *Edición del Tricentenario*. <https://dle.rae.es/alga>
- Bomba Centrífuga De Frecuencia Variable*. (2022). alibaba.com. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Electric-automatic-high-flow-horizontal-single-1600555709469.html>
- Camurati, J. R., Hocsman, J., & Salomone, V. N. (2019). Potencialidades de las macroalgas marinas argentinas. *Marine and Fishery Sciences (MAFIS)*, 32(2), 169-183. <https://doi.org/10.47193/mafis.3222019121907>

Conocimientosweb.net. (2014). Tipos de secadores solares. *Conocimientos - La divisa del nuevo milenio*. <https://conocimientosweb.net/portal/article3004.html>

Controlador De Medidor De Ph Automático Industrial. (2022, noviembre 14). alibaba.com. https://spanish.alibaba.com/p-detail/GWQ-ph6.0-60842535153.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.63c59d04443niR

Controlador Lógico Programable. (2022). alibaba.com. https://spanish.alibaba.com/p-detail/high-60562849592.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.73fb5effeeGghA&s=p

Elizondo Acosta, E. M., & Freijo Torres, T. R. (2020). *Estudio comparativo de la concentración de metales en el alga parda (Padina durvillaei) recolectada en la zona intermareal rocosa de las playas de Salinas y Ballenita* [PhD Thesis]. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Químicas.

Espinosa-Antón, A. A., Hernández-Herrera, R. M., González González, M., Espinosa-Antón, A. A., Hernández-Herrera, R. M., & González González, M. (2021). Potencial de las macroalgas marinas como bioestimulantes en la producción agrícola de Cuba. *Centro Agrícola*, 48(3), 81-92.

Fim Rationale And Proposed Guidelines For The Nutraceutical Research & Education Act – NREA – Fimdefelice. (2022). fimdefelice.org. <https://fimdefelice.org/fim-rationale-and-proposed-guidelines-for-the-nutraceutical-research-education-act-nrea/>

Jaramillo-Arango, A. P., & Yepes-Osorio, S. (2019). *Revisión de metodologías de extracción para la búsqueda de un potencial cosmecéutico de macro- algas: Búsqueda de propiedades antioxidantes y antimicrobianas*. 10.

Medidor De Flujo De Masa De Gas De Aire De Nitrógeno Digital. (2022). alibaba.com.

https://spanish.alibaba.com/p-detail/Nitrogen-60758209694.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.2a72285cnhlDba&s=p

Medidor De Flujo De Turbina De Agua De Acero. (2022). alibaba.com.

https://spanish.alibaba.com/p-detail/Double-60829787678.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.6c6e16d3FW5pmy&s=p

Mesa Mirabal, M. S. (2018). *Propuesta del sistema de tratamiento de gases de combustión*

de la ETE Carlos Manuel de Céspedes para la planta de cultivo intensivo de macroalgas marinas [Thesis, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Facultad de Química Farmacia. Departamento de Ingeniería Química].

<http://dspace.uclv.edu.cu:8089/xmlui/handle/123456789/10370>

Ortiz Viedma, J. (2011). *Composición nutricional y funcional de las algas clorofíceas chilenas: Codium fragile y Ulva lactuca.*

Perry, R. H., Green, D. W., Maloney, J. O., & Arrébola, L. A. (2001). *Manual del ingeniero químico.* McGraw-Hill Madrid.

Regulador De Presión De Gas Y Aire Natural. (2022). alibaba.com.

https://spanish.alibaba.com/p-detail/high-1600062497016.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.322b4c13Z652ah&s=p

Rios Garcia, J. (2016). *Propuesta de diseño preliminar de una planta industrial de cultivo*

intensivo de macroalga (Ulva Lactuca) a partir del CO2 residual de la

Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes [PhD Thesis]. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Facultad de Química.

Rosabal Vega, J. M., & Garcel Puyans, L. (2010). *Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas*.

Segura Pulido, Y. (2013). *Evaluación de un sistema experimental piloto para el cultivo intensivo de la macroalga marina Ulva lactuca* [PhD Thesis]. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Facultad de Química.

Sosa, D. (2020). *Propuesta tecnológica de una instalación piloto de cultivo intensivo de macroalgas Ulva Lactuca para estudios de biorremediación de los gases de combustión de la TEC Carlos M. de Céspedes*. Universidad de Cienfuegos.

Suárez, A. M., Martínez-Daranas, B., & Alfonso, Y. (2015). *Macroalgas marinas de Cuba*. Editorial UH.

Tanque De Almacenamiento De Agua De 3000 Litros. (2022). alibaba.com. https://spanish.alibaba.com/p-detail/Large-60830426385.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.50855b9eDRTPvM

Torre De Absorción Industrial. (2022). alibaba.com. <https://spanish.alibaba.com/p-detail/industrial-1600309039342.html?spm=a2700.7724857.0.0.670b2b80aqJZJJ&s=p>

Ulva lactuca / Acuisur. (2022). alibaba.com. <http://acuisurperu.com/pf/ulva-lactuca/>

Usos y aplicaciones de las algas. (2022). alibaba.com. <https://www.asturnatura.com/algas/usos-propiedades-algas.html>

Valdés, Y. N. (2021). Determinación de los parámetros adecuados para la simulación del proceso de crecimiento de la microalga: E25. *Revista Estudiantil Nacional de*

Ingeniería y Arquitectura, 2(3), Art. 3.

<https://renia.cujae.edu.cu/index.php/renia/article/view/28>

ANEXOS

Anexo 1

Macroalgas



Anexo 2

Macroalga y microalgas



Anexo 3*Biorreactor rectangular***Anexo 4***Torre de absorción de gases*

Anexo 5

Bomba seleccionada



Anexo 6

Compresor seleccionado



Anexo 7

Características técnicas requeridas

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

- Potencia (HP): 40 HP
- Potencia (KW): 30 Kw
- Presion Máxima: 10 Bar (145 psi)
- Aire suministrado: 3800 l/min
- Alimentación: 400/TRIF/50
- Sonoridad: 75 dB (A)
- Rosca conexión: 3/4"
- Lubricado: Sí
- Dimensiones: 1100x710x1100
- Peso (Kg): 391 Kg

Anexo 8

Tanques de almacenamiento seleccionados



Anexo 9

Secadero solar seleccionado

