

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FQF**  
Facultad de  
Química y Farmacia

## TRABAJO DE DIPLOMA

*Título: "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".*

*Autor: Mario Sergio Mesa Mirabal*

*Tutores: Ing. Liset Roche Delgado*

*Dr. C. Agustín García Rodríguez*

*Curso 2017-2018*

Santa Clara  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

## PENSAMIENTO

*“Vemos el universo en la forma en que es porque nosotros existimos”*

*Principio antrópico*

## DEDICATORIA

*El presente trabajo es dedicado a mi familia y amigos que me acompañaron, apoyaron y ayudaron a lo largo de mi estancia en la universidad.*

## AGRADECIMIENTOS

*Mis más sinceros agradecimientos a mi familia por el apoyo y confianza a lo largo de todos mis estudios, a mis tutores por ayudarme en la confección de este trabajo, a mis amigos por compartir y ayudarme en momentos difíciles, en fin a todos los que de una forma u otra me han ayudado, gracias.*

---

## RESUMEN

En el siglo actual se han intensificado los proyectos de investigación encaminados al desarrollo de una tecnología viable que permita obtener biomasa algal a partir de macroalgas. El presente trabajo persigue realizar un estudio para proponer un sistema adecuado para el tratamiento de los gases de combustión de la Empresa Termoeléctrica (ETE) “Carlos Manuel de Céspedes” que permita su empleo como nutriente en el cultivo intensivo de macroalgas marinas. Se evaluó el esquema de tratamiento para 120 m<sup>3</sup>/h de gases de combustión empleando el software Aspen HYSYS, lo que permitió seleccionar una alternativa adecuada según las características específicas del proceso, la cual consiste en el empleo de una columna de burbujeo empleando agua para la remoción del material particulado presente en los gases de combustión de la ETE debido a que las concentraciones de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> se encuentran en el rango de asimilación de la *Ulva Lactuca*. Las dimensiones principales de la torre se determinaron con el empleo del software, resultando el diámetro de 0,6m, la altura de 4,2m y el tiempo de residencia del líquido de 300s. Se incluyó la propuesta de un sistema de control automático considerando un pH de 6,8 como parámetro de control fundamental del cultivo de la *Ulva Lactuca*. El análisis técnico económico de la inversión propuesta indicó que es viable efectuar el proyecto con VAN de \$862607,82, una TIR del 36% y un periodo de recuperación de 3,3 años aproximadamente. La repercusión ambiental implica una disminución de unas 849 t/año de emisiones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

## Abstract

In the current century, research projects aimed at developing a viable technology for obtaining algal biomass from seaweeds have intensified. The present work aims to carry out a study to propose a suitable system for the treatment of the combustion gases of the thermoelectric company (ETE) "Carlos Manuel de Céspedes" that allows its use as a nutrient in the intensive cultivation of marine macroalgae. The treatment scheme for 120 m<sup>3</sup>/h of combustion gases was evaluated using the Aspen HYSYS software, which allowed the selection of a suitable alternative according to the specific characteristics of the process, which consists of the use of a bubbling column using water to remove the particulate matter present in the ETE combustion gases due to the fact that the SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> concentrations are in the *Ulva Lactuca* assimilation range. The main dimensions of the tower were determined using the software, resulting in a diameter of 0.6m, a height of 4.2m and a residence time of 300s for the liquid. The proposal for an automatic control system was made considering a pH of 6.8 as a fundamental control parameter of the *Ulva Lactuca* crop. The technical-economic analysis of the proposed investment indicated that it is feasible to carry out the project with a NPV of \$862607.82, an IRR of 36% and a payback period of approximately 3.3 years. The environmental impact implies a reduction of about 849 t/year in CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere.

## Índice

Introducción .....	1
Capítulo 1: Revisión bibliográfica .....	3
Introducción al capítulo. ....	3
1.1 Generalidades de los gases de combustión.....	3
1.2 Efectos Ambientales de los gases de combustión.....	7
1.3 Tratamientos de gases de combustión clasificación. ....	9
1.4 Tratamiento de los gases de combustión Post-combustión.....	11
1.5 Factores que influyen en el cultivo intensivo de macroalgas.....	13
1.6 Uso de gases de combustión en el cultivo de macroalgas.....	18
1.7 Modelación de sistemas de tratamiento de gases de combustión en Aspen. ....	20
Conclusiones parciales.....	22
Capítulo 2: Selección del sistema de tratamiento de Gases de Combustión. ....	24
Introducción al capítulo .....	24
2.1 Descripción del proceso para cultivo intensivo de macroalgas ( <i>Ulva Lactuca</i> ).....	24
2.2 Etapas del proceso de cultivo de macroalgas.....	25
2.3 Sección de tratamiento de gases de combustión.....	26
2.4 Simulación de las distintas alternativas de operación.....	28
2.5 Selección de la alternativa de operación mediante la simulación.....	31
2.6 Evaluación de la alternativa de operación mediante la simulación. ....	33
2.7 Diseño y/o selección del equipamiento para la sección de tratamiento de gases de combustión.....	36
2.7.1 Selección del sistema de limpieza de gases de combustión. ....	36
2.7.2 Selección de la bomba centrífuga para el agua de la torre.....	37



---

2.7.4 Diseño del tanque para agua de mar. ....	38
2.8 Propuesta de control automático para el sistema de tratamiento de gases.....	39
Conclusiones parciales.....	40
Capítulo 3: Análisis técnico-económico para la instalación. Evaluación ambiental. ....	41
Introducción al capítulo .....	41
3.1 Estimación del costo del equipamiento para la instalación de cultivo intensivo de macroalgas marina. ....	41
3.2 Estimación del costo de inversión. ....	42
3.3 Estimación del costo de producción. ....	43
3.4 Análisis de Rentabilidad. ....	45
3.5 Análisis preliminar de los beneficios ambientales de la instalación .....	46
Conclusiones parciales.....	46
Conclusiones .....	47
Recomendaciones .....	48
Referencias Bibliográficas.....	49
Anexos .....	52

## Introducción

Como consecuencia de la explotación discriminada de los combustibles fósiles y los diversos procesos industriales, se ha acelerado el efecto invernadero en el planeta trayendo consigo cambios en las condiciones climáticas, amenazando con la vida en el planeta. No se está a tiempo de corregir los daños ocasionados pero si se puede mitigar su efecto si tomamos conciencia de la necesidad del desarrollo sostenible.

Entre los gases que afectan la atmósfera se encuentra el CO<sub>2</sub>, el cual es un causante del efecto invernadero y de la acidificación de los mares. Las plantas y las algas emplean el CO<sub>2</sub> como fuente de nutrientes pero no es suficiente su consumo para mitigar el efecto del CO<sub>2</sub> en el planeta (Roche, 2015).

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 CO<sub>2</sub> a través de la fotosíntesis, reduciendo así las emisiones de CO<sub>2</sub>, a la vez que producen una valiosa biomasa fuente de numerosos productos beneficiosos para el hombre como extracto de ficocoloides o gomas marinas como agar, alginatos y carrageninas para la industria de alimentos tanto para consumo humano como animal, cosmetología, farmacología 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 prioritariamente en la actualidad en todo el mundo (Arias, 2017).

El gobierno de Cuba siempre ha perseguido mantener un desarrollo sostenible, aunque existen provincias con alto grado de industrialización y altas emisiones de gases contaminantes. Una de estas provincias es la de Cienfuegos, en ella están ubicadas una refinería de petróleo, una termoeléctrica y otros centros de gran importancia. Estos factores nos llevan a proponernos alternativas que puedan disminuir los efectos nocivos de la contaminación ambiental como es el empleo del CO<sub>2</sub> en la obtención de biomasa.

En los últimos años se han evaluado nuevas tecnologías para el proceso de cultivo de macroalgas, para esto se ha combinado un grupo de técnicas, tradicionales y otras novedosas de modelado y simulación de procesos industriales, y de conocimientos biológicos, con interés económico-humano para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> y

emplearlo como materia prima en procesos biológicos, obteniendo productos de alto valor agregado.

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

### **Problema Científico**

No existe una información detallada del tratamiento para la eliminación de ciertas sustancias nocivas de los Gases de Combustión que contienen el nutriente fundamental ( $\text{CO}_2$ ) para el cultivo intensivo de macroalgas marinas.

### **Hipótesis**

Con el tratamiento adecuado de una corriente multicomponente de gases de combustión es posible satisfacer los requerimientos de  $\text{CO}_2$  para el cultivo intensivo de macroalgas marinas.

### **Objetivo general:**

Proponer un sistema de tratamiento de gases de combustión de la ETE “C. M. Céspedes” para su empleo como nutriente en el cultivo intensivo de macroalgas marinas.

### **Objetivos específicos:**

1. Delimitar el sistema de tratamiento de gases de combustión de la ETE “C.M. Céspedes” adecuados para el cultivo intensivo de macroalgas, a partir del análisis de la revisión bibliográfica y de las particularidades y características de la instalación.
2. Evaluar distintas alternativas del tratamiento de los gases de combustión mediante la simulación con el uso del software Aspen HYSYS.
3. Proponer un sistema de tratamiento de gases de combustión para la planta de cultivo intensivo de Macroalgas Marinas.
4. Determinar la factibilidad técnico-económica y ambiental de la tecnología propuesta.
5. Determinar el efecto ambiental de la Biorremediación Atmosférica por mitigación de la contaminación generada por los gases de combustión industriales, a partir de la instalación de cultivo intensivo de Macroalgas Marinas propuesta.

## Capítulo 1: Revisión bibliográfica.

### Introducción al capítulo.

La humanidad a medida que va desarrollando mecanismos para suplir la necesidad de energía, ha añadido CO<sub>2</sub> a la atmósfera; en primer lugar, quemando combustibles fósiles y, en segundo lugar, talando y prendiendo fuego a los bosques. Principalmente, los países industrializados, son responsables de las tres cuartas partes del CO<sub>2</sub> liberado por los combustibles fósiles, los automóviles, las plantas eléctricas, entre otros elementos utilizados cotidianamente. Estas razones nos obligan a la búsqueda de alternativas que permitan un desarrollo sostenible, remitiéndonos a sectores en expansión como la acuicultura. Las macroalgas usan la luz como fuente de energía y el agua de mar como medio de crecimiento, asimismo capturan el CO<sub>2</sub> disuelto y los nutrientes. Esta capacidad de biorremediación aumenta el valor potencial de la biomasa algal.

### 1.1 Generalidades de los gases de combustión.

Los gases de escape generados en los procesos de combustión se denominan gases de combustión. Su composición depende del tipo de combustible, de las condiciones de combustión y el valor del coeficiente de exceso de aire. Muchos de los componentes de los gases de combustión son contaminantes del aire y por tanto deben eliminarse de los gases de combustión con procedimientos especiales de limpieza extremadamente lentos y costosos, antes de liberar el gas a la atmósfera conforme a la normativa legal. Los gases de combustión en su estado original se conocen como gases brutos y como gas limpio una vez que han pasado por las fases de limpieza. A continuación se explican los principales componentes de los gases de combustión.

#### Nitrógeno (N<sub>2</sub>):

Con el 79 % en volumen, el nitrógeno es el principal componente del aire. Este gas incoloro, inodoro e insípido se aporta mediante el aire de combustión pero no tiene un papel directo en la misma; pasa como medio inerte y medio para disipar el calor y se devuelve a la atmósfera. Sin embargo, el nitrógeno contribuye en parte, junto con el nitrógeno del combustible, a la formación de óxidos de nitrógeno peligrosos.

**Anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>):**

El anhídrido carbónico es un gas incoloro e insípido, con un gusto ligeramente ácido, y se genera en todos los procesos de combustión y durante la respiración. Debido a su propiedad de filtrar el calor radiante, es una contribución importante al efecto invernadero. Su contenido en el aire ambiente es sólo del 0,03% y la concentración máxima permitida de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) en el puesto de trabajo es del 0,5%; concentraciones en el aire inhalado superiores al 15% producen la pérdida de conciencia en las personas.

**Vapor de agua (humedad):**

El hidrógeno contenido en el combustible se une con el oxígeno para formar agua (H<sub>2</sub>O). Dependiendo de la temperatura de los gases de combustión, aparece luego conjuntamente con el agua del combustible y el aire de la combustión o como humedad de los gases de combustión (a temperaturas alta) o como condensado (a temperaturas baja).

**Sustancias sólidas (polvo, hollín):**

Las sustancias sólidas en los gases de combustión se originan a partir de los constituyentes incombustibles de los combustibles sólidos y líquidos. Estas incluyen, por ejemplo, óxidos de silicio, aluminio, calcio, etc., en el carbón y los sulfatos de diversas sustancias en el fueloil pesado. El efecto nocivo del polvo sobre las personas está producido particularmente por la deposición de sustancias tóxicas y cancerígenas en las partículas de polvo.

**Oxígeno (O<sub>2</sub>):**

El oxígeno no utilizado en el proceso de combustión, si hay exceso de aire, aparece como gas en los gases de combustión y es una medida de la eficiencia de la combustión. Se usa para determinar los parámetros de combustión y como variable de referencia.

**Monóxido de carbono (CO):**

El monóxido de carbono es un gas tóxico incoloro e inodoro. Se genera en gran medida como consecuencia de la combustión incompleta de combustibles fósiles (instalaciones de combustión), combustibles de motor (vehículos) y otros materiales que contienen carbono. El CO es, en general, inocuo para las personas porque rápidamente se une con el oxígeno

del aire para formar  $\text{CO}_2$ . En recintos cerrados, sin embargo, el CO es extremadamente peligroso, ya que las personas que respiran aire con una concentración de sólo 700 ppm morirán en pocas horas. La concentración máxima en el puesto de trabajo es 50 ppm.

### **Óxidos de nitrógeno (NO y $\text{NO}_2$ , fórmula total $\text{NO}_x$ ):**

En los procesos de combustión, el nitrógeno del combustible y, a temperaturas elevadas, el del aire de combustión se une en cierta medida con el oxígeno del aire de combustión para formar óxido nítrico NO (NO combustible y NO térmico) en primera instancia, que luego se oxida cuando entra en contacto con el oxígeno en el conducto de los gases de combustión y posteriormente en la atmósfera, para formar el peligroso dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ). Ambos óxidos son tóxicos; el  $\text{NO}_2$  en particular es un peligroso veneno respiratorio y en combinación con la luz solar contribuye a la formación de ozono. Se utilizan tecnologías caras tales como el proceso SCR para limpiar los gases de combustión que contienen  $\text{NO}_x$ . Medidas especiales relacionadas con la combustión, tales como el suministro de aire por etapas, se utilizan para reducir los óxidos nítricos en la etapa de combustión. (Gomez, 2005)

### **Anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ):**

El anhídrido sulfuroso es un gas incoloro, tóxico con un olor picante. Se produce como resultado de la oxidación del mayor o menor volumen de azufre contenido en el combustible. La concentración máxima en el puesto de trabajo es 5 ppm. En combinación con agua o condensado, se forman ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), ambos de los cuales están relacionados con los diversos tipos diferentes de deterioro medioambiental a la vegetación y edificios. Las plantas de desulfuración de los gases de combustión (FGD) se usan para reducir los óxidos de azufre. (Mata, 2014)

### **Sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ):**

El sulfuro de hidrógeno es un gas tóxico que huele mal incluso en concentraciones mínimas (aprox.  $2,5 \mu\text{m}/\text{m}^3$ ). Es un componente que se encuentra naturalmente en el gas natural y el petróleo y por consiguiente está presente en refinerías e instalaciones de procesamiento de gas natural, pero también en tenerías, actividades agrícolas y, no de forma menos importante, tras la combustión incompleta en los convertidores catalíticos de vehículos. Se usan diversos métodos para eliminar el  $\text{H}_2\text{S}$  de los gases de combustión, incluida la combustión

para formar  $\text{SO}_2$ , determinados procesos de absorción o, para niveles más importantes, la conversión en azufre elemental en una instalación Claus.(EPA, 2002)

### **Hidrocarburos (HC o $\text{C}_x\text{H}_y$ ):**

Los hidrocarburos son un amplio grupo de compuestos químicos formados exclusivamente por carbono e hidrógeno. Los HC son las sustancias más importantes en química orgánica; en la naturaleza se encuentran en el petróleo, gas natural o el carbón. Se pueden emitir HC cuando se fabrican productos hidrocarbonados (ej. en refinerías) así como durante su uso y eliminación (disolventes, plásticos, pinturas, combustibles, residuos, etc.). Las combustiones incompletas son una fuente particular de emisiones de HC. Estas también incluyen los incendios forestales y los cigarrillos, por ejemplo. Los HC también contribuyen al efecto invernadero. Ejemplos de HC incluyen metano ( $\text{CH}_4$ ), butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) y benceno ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), pero también componentes cancerígenos como el benzopireno. El potencial total de compuestos orgánicos volátiles en los gases de combustión normalmente se describe como HC total o  $\text{C}_x\text{H}_y$  total. Esta suma se determina generalmente en los gases de combustión.

Según (Arias, 2017) el metano se produce en pequeñas cantidades en la quema de combustibles debido a la combustión incompleta de los hidrocarburos del mismo. Las emisiones de metano indican en general una ineficiencia en el proceso de combustión. La producción de  $\text{CH}_4$  depende de la temperatura de la caldera/horno/estufa. En el caso de las instalaciones de combustión eficientes y de gran envergadura, y de las aplicaciones industriales, la tasa de emisión es muy baja. En fuentes menores de combustión, las tasas de emisión son, en general, más altas, sobre todo cuando se produce combustión sin llama. Las mayores tasas de emisión de  $\text{CH}_4$  reproducen en aplicaciones residenciales (estufas pequeñas y quema a cielo abierto).

### **Cianuro de hidrógeno (HCN):**

El cianuro de hidrógeno (también conocido como ácido cianhídrico) es un líquido extremadamente venenoso con un punto de ebullición de  $25,6^\circ\text{C}$ ; donde está presente, adopta la forma gaseosa en los gases de combustión. El HCN también puede encontrarse en instalaciones de incineración de residuos.

**Amoníaco (NH<sub>3</sub>):**

En los gases de combustión, el amoníaco juega un papel en la reducción de los óxidos de nitrógeno. Se añade a los gases de combustión en cantidades exactamente dosificadas en reactores de óxidos de nitrógeno y desencadena la conversión de los óxidos de nitrógeno en nitrógeno y agua. La parte no utilizada (pérdida de NH<sub>3</sub>) se reduce fuertemente mediante etapas de limpieza posteriores y está presente normalmente en los gases limpios a 2 mg/m<sup>3</sup> o menos.

**Halogenuros de hidrógeno:**

Si se queman carbón y/o sustancias residuales, se producen los haluros de hidrógeno HCl y HF que, en combinación con la humedad, forman ácidos agresivos. Estas sustancias se lavan de los gases de combustión en gran medida, en las instalaciones limpiadoras de gases de combustión (lavadores).

**1.2 Efectos Ambientales de los gases de combustión.**

La cantidad y las características de las emisiones a la atmósfera dependen de factores como el combustible, el tipo y el diseño de la unidad de combustión, las prácticas operacionales, las medidas de control de las emisiones y su estado de mantenimiento (por ejemplo, control primario de la combustión, tratamiento secundario del gas de combustión) y la eficiencia general del sistema.

Las principales emisiones atmosféricas generadas por la combustión de combustibles fósiles (o biomasa) corresponden a dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) y gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Cabe señalar que el dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno son precursores de lluvia ácida. (SMA, 2006)

Las emisiones de CO<sub>2</sub>, propias de la combustión, van a incrementar el CO<sub>2</sub> ya existente en la atmósfera. Aquí se encuentra el principal causante del efecto invernadero en el planeta debido a la paulatina destrucción de la capa de ozono; protectora de nuestra atmósfera terrestre. Es decir, a mayor cantidad de Centrales Termoeléctricas, mayor incremento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, y mayor contribución al calentamiento global en el planeta. Mientras



la clara tendencia mundial es a ir eliminando paulatinamente este tipo de emisiones, para reducir y frenar el efecto invernadero.(Angel, 2012)

Estas emisiones tienen diferente impacto en los suelos, la fauna y la flora, e incluso en las construcciones civiles. Según (Plaza, 2010b)el problema en los suelos se presenta con la acidificación de los mismos, siendo la sensibilidad a ésta mayor en aquellas tierras donde la degradación de los minerales se produce lentamente. Cuando el suelo se acidifica es esencial que sus nutrientes se lixivien, lo cual reduce la fertilidad de la tierra. Además, el proceso de acidificación también libera metales que pueden dañar a los microorganismos del suelo responsables de la descomposición, así como a los pájaros y mamíferos superiores de la cadena alimentaria, incluido el hombre. Por otro lado, el ácido sulfúrico ataca los materiales de construcción como mármol, cantera, cal y mortero. Muchos de los monumentos, edificios, esculturas e iglesias se han deteriorado por esta causa.

A la fauna y al hombre los afecta de la misma forma, pues no pensemos que estamos exceptos de los riesgos por ser los causantes, (Ávila, 2011) enumera los principales efectos de dicha contaminación a la vida en general: el aumento de la contaminación generada por la emisión de gases, ha afectado notablemente la salud de los seres humanos. La respiración diaria del ser humano contiene óxidos de azufre, residuos de plomo y gases provenientes de los vehículos y fábricas, lo cual acrecienta la bronquitis crónica, las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas, y esto a su vez, genera el aumento de los cánceres y enfermedades cardiovasculares. En muchas ocasiones, las enfermedades ocasionadas por la contaminación en el aire son más visibles, una de ellas es la irritación de los ojos, esto se debe, a la presencia de ozono y de partículas de polvo en el aire. Las partículas relativamente grandes, probablemente, son retenidas en la cavidad nasal y en la faringe, mientras que las partículas más pequeñas alcanzan los pulmones, donde quedan retenidas o, si son todavía más pequeños, pasan a los fluidos corporales. La exposición a una mayor radiación UVB podría suprimir la eficiencia del sistema inmunológico del cuerpo humano. La investigación confirma que la radiación UVB tiene un profundo efecto sobre el sistema inmunológico, cuyos cambios podrían aumentar los casos de enfermedades infecciosas con la posible reducción de la eficiencia de los programas de inmunización. Los contaminantes químicos del aire pueden causar resequedad de las mucosas, irritación y comezón en la piel, así como diversas enfermedades respiratorias, vasculares y cardíacas, disminución de la

capacidad de la sangre para transportar sustancias nutritivas y oxígeno al organismo, trastornos.

### **1.3 Tratamientos de gases de combustión clasificación.**

#### **Tecnologías existentes.**

Las técnicas existentes hasta el momento de purificación y captura del CO<sub>2</sub> se han agrupado en tres categorías generales:

- Post-combustión
- Oxi-combustión
- Pre-combustión

En el anexo 1 se muestran estos grupos y sus interacciones.

Técnicamente, el objetivo de dichos procesos es obtener una corriente concentrada de CO<sub>2</sub> que pueda ser almacenada o, en el caso que nos ocupa, empleada en otros procesos como la producción de macroalgas marinas. El empleo de cada uno de estos métodos depende fundamentalmente del tipo de combustible empleado, la presión del gas y la concentración de CO<sub>2</sub>. A continuación se analizan cada uno de dichos procedimientos.

#### **Captura de CO<sub>2</sub> en Pre-combustión.**

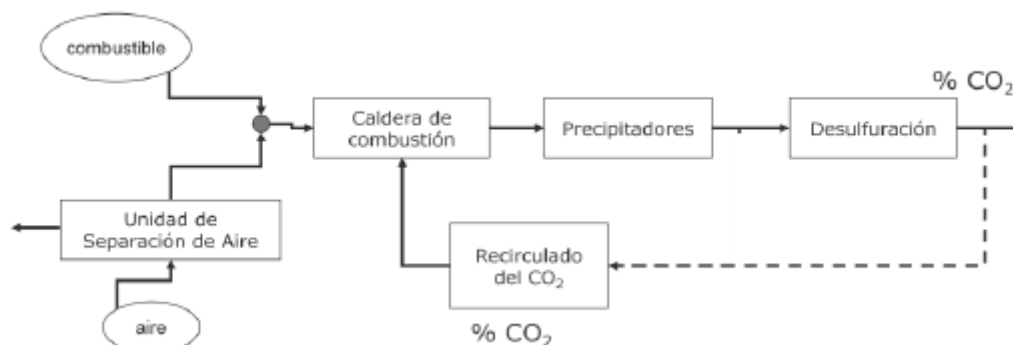
Este sistema está muy relacionado con la producción de hidrógeno, el cual es un agente muy importante en distintos procesos, entre los cuales se incluyen:

- Generar energía eléctrica o calor (produciéndose únicamente vapor de agua).
- La síntesis de amoníaco.
- La producción de fertilizantes.
- Los hidroprocesamientos en las refinerías de petróleo.

Básicamente consiste en producir, a partir de gas natural o gas sintético (proveniente de la gasificación de carbón u otros hidrocarburos), una mezcla gaseosa compuesta principalmente del hidrógeno mencionado H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> para posteriormente separar estos dos gases. La separación se basa en la des carbonización del combustible antes de la combustión mediante técnicas de gasificación del carbón o reformado del gas natural. (Morales and Torres, 2008)

### Captura de CO<sub>2</sub> en Oxi-combustión.

Este proceso es realizado durante la combustión y hace tiempo que es aplicada. Consiste en el empleo de oxígeno en lugar de aire para la combustión, dando lugar a gases de combustión compuestos fundamentalmente por H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, lo cual facilita la separación y almacenamiento del CO<sub>2</sub>.

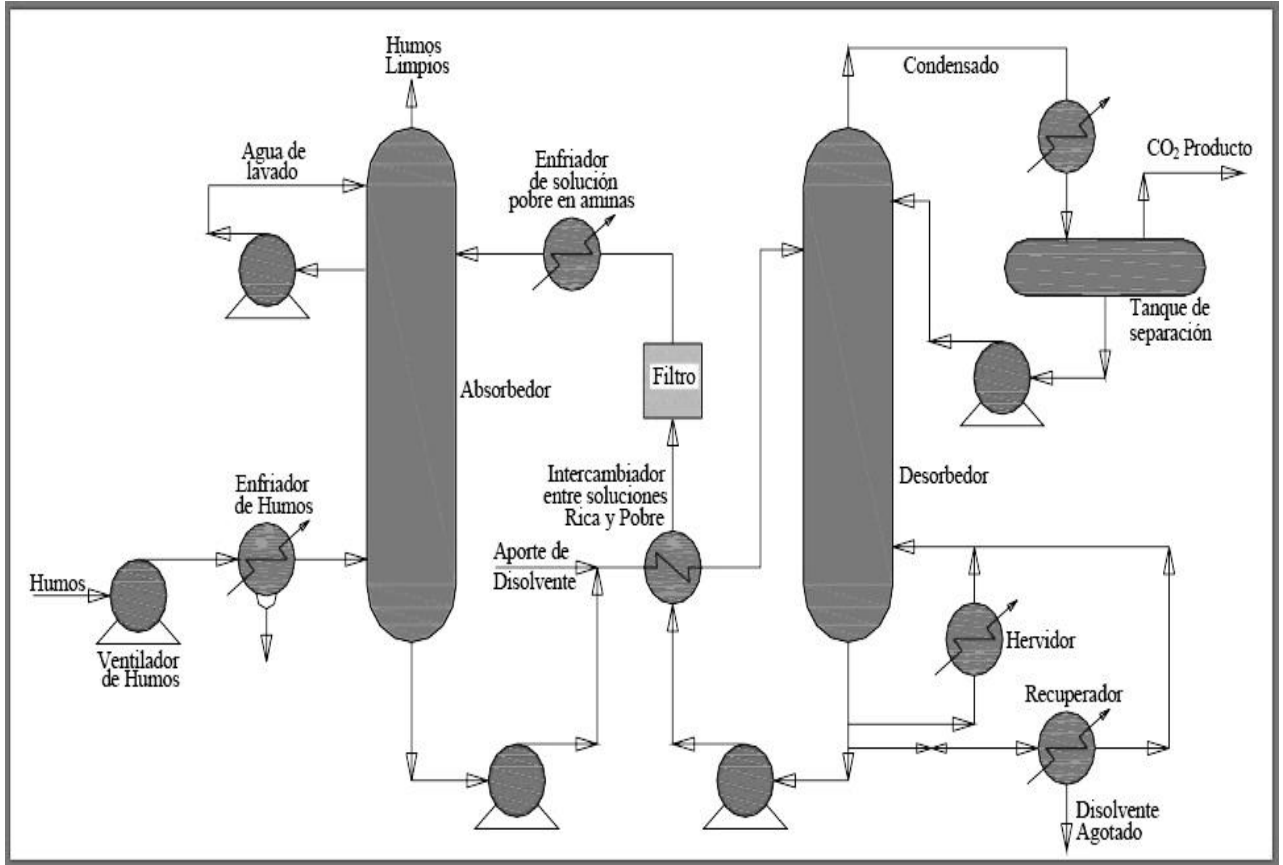


**Figura 1.1.**Esquema de operación de la oxi-combustión.

### Captura de CO<sub>2</sub> Post-combustión.

Los sistemas de captura de CO<sub>2</sub> encuadrados en la tecnología de postcombustión se basan en la separación del CO<sub>2</sub> de los humos generados en los procesos de combustión de combustibles fósiles (como las centrales térmicas clásicas). En principio este sistema de captura puede aplicarse a humos procedentes de la combustión de cualquier combustible fósil pero en la práctica las impurezas que contengan afectarían al diseño y al coste de la instalación. Por lo cual se hace necesaria la colocación, aguas arriba del sistema de captura de CO<sub>2</sub>, de unidades que eliminen otros contaminantes, como pueden ser SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas, ácidos, mercurio, etc. Hay que resaltar que, en general, de todos los sistemas conocidos para la captura del CO<sub>2</sub>, los basados en la post-combustión son los más desarrollados hasta el momento y acumulan una cierta experiencia comercial a una escala suficientemente grande. Dentro de los varios procesos que se pueden usar para capturar el CO<sub>2</sub> de los gases de combustión, diferentes estudios comparativos (Hendriks, 1994; Riemer and Omerod, 1995; IEA GHG, 2000b) han demostrado que la mejor opción son los procesos de absorción basados en solventes químicos. Estos procesos ofrecen una altísima eficiencia de captura y selectividad, requieren una menor energía y tienen un menor coste

que el resto de procesos de post-combustión. Además, esta tecnología está disponible comercialmente, aunque aún no a escala de una central de generación de energía eléctrica. (Fernández, 2008)



**Figura 1.2:** Diagrama de flujo del proceso de absorción de CO<sub>2</sub> con amidas.

#### 1.4 Tratamiento de los gases de combustión Post-combustión.

Los tratamientos Post-combustión de los gases se dividen en dos grandes grupos según (Fernández, 2008), estos grupos son las tecnologías existentes y las tecnologías emergentes.

##### **Tecnologías existentes.**

Empleo de solventes: estas tecnologías de absorción se sirven del carácter reversible de la reacción química de un solvente acuoso alcalino con un gas ácido. Estos tratamientos están enfocados a capturar el CO<sub>2</sub> y logran una pureza del 99.9% en volumen en condiciones de vapor saturado. El solvente escogido debe tener una gran capacidad de absorción de CO<sub>2</sub>, calor de desorción bajo, baja formación de subproductos y una tasa de descomposición baja. Las tres tecnologías existentes se presentan en la tabla 1.1.

Al analizar los datos de la tabla (Fernández, 2008) determinó que el consumo de solvente principal oscila entre 0,2-1,6 kg/tCO<sub>2</sub>, KS-1 es el que menos consume y ECONAMINE el que más consume.

**Tabla 1.1.** Características de los procesos de absorción con aminas utilizados comercialmente.

Proceso	Autores, año	Combustible de la caldera	Solvente	Máxima capacidad de captura (tCO <sub>2</sub> /día)
The Kerr-McGee/ABB Lummus Crest Process	Barchas y Davis, 1992	Coque y carbón	Disolución acuosa de MEA (monoetanolamina) del 15-20% en peso	800
The Fluor Daniel ECONAMINE Process	Sander y Mariz, 1992, Chapel et al., 1999	-	Disolución acuosa de MEA (monoetanolamina) del 30% en peso	320
The Kansai Electric Power Co., Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., KEPCO/MHI Process	Mimura et al., 1999 y 2003	-	Aminas Sterically hindered KS-1, KS-2, KS-3	200

Estos tratamientos necesitan de un acondicionamiento de los gases, puesto que al salir de las calderas las temperaturas de los gases son mayores que 100<sup>0</sup>C y estos solventes necesitan de temperaturas más bajas para que puedan ocurrir las reacciones. Este proceso de enfriado puede realizarse poniendo los gases en contacto directo con agua, sirviendo además para eliminar parte del material particulado como las cenizas. También se eliminarían los otros gases ácidos presentes en dependencia del combustible que se haya quemado, puesto que estos gases pueden reaccionar con los solventes.

Como resultado de la descomposición de las aminas se generan efluentes como el amoníaco y sales estables. Existen procesos en los que dichas sales estables se eliminan de la disolución en un recuperador o *reclaimer*, creándose un residuo efluente que se trata según las pertinentes normas de Seguridad, Salud y Medio Ambiente. (Fernández, 2008)

### **Tecnologías emergentes.**

En la actualidad se estudian otros solventes que presenten un menor consumo de energía para su recuperación y bajos costos. Se han propuesto tecnologías en las que es eliminado el oxígeno de los gases de combustión para poder emplear solventes sensibles a este. Además aumentos en la concentración de solvente lo que traería una disminución del tamaño de los equipos, reduciendo su costo.

Los procesos de adsorción también son empleados con el propósito de capturar el CO<sub>2</sub>, por lo general se emplean tamices moleculares y carbón activado, además se usa la desorción por diferencia de presión.

Los procesos con membranas se usan comercialmente para la eliminación del CO<sub>2</sub> del gas natural a alta presión y con una alta concentración de CO<sub>2</sub>. En humos de combustión la baja presión parcial del dióxido de carbono le confiere una baja “fuerza” para la separación del gas. El resultado es que la separación con las membranas poliméricas comercialmente disponibles redunde en mayores consumos energéticos que los requeridos para los procesos de absorción química. Además, el máximo porcentaje de CO<sub>2</sub> capturado es menor.

### **1.5 Factores que influyen en el cultivo intensivo de macroalgas.**

Existen diferentes factores que son de vital importancia para cultivar macroalgas marinas, como son:

- pH
- Conductividad
- Turbidez
- Luz solar
- Temperatura
- Salinidad
- Nitrógeno y fosforo
- CO<sub>2</sub>

A continuación se presenta información detallada de cada factor enumerado anteriormente:

**El pH** está generalmente determinada 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. (Rodríguez et al., 2012)

La totalidad de los factores que intervienen en el valor del pH tienen como origen en los minerales del suelo, respiración de los organismos acuáticos, materia orgánica, productos de la fotosíntesis de las plantas acuáticas, dióxido de carbono y otras sustancias que provienen de las lluvias y en los desechos generados por los pobladores que habitan en las orillas de las costas (aguas servidas).

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. (Roche, 2015)

**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 ciertos 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 tropicales las cantidades de la conductividad están compuestas con la naturaleza geoquímica del terreno, su afluencia varía fundamentalmente en el tiempo de lluvia, sequía y estado trófico. (Rios, 2016)

**La 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 (OD). (Laurens, 2017) Debido a 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. (Follano, 2014)

**La luz solar:** en el medio acuático, al incidir los rayos solares sobre su superficie, una parte es refractada nuevamente hacia la atmósfera. La fracción que atraviesa la superficie es absorbida progresivamente por la el agua, las sustancias disueltas y, sobre todo, por la materia en suspensión, incluidos los organismos planctónicos. (Euractiv, 2009)

A partir de una cierta profundidad (variable según la latitud y la turbidez del agua), la mayor cantidad de luz disponible es insuficiente para la vida vegetal, por lo que las algas desaparecen de esos lugares. Alguna de estas plantas especialmente adaptada a la escasez luminosa puede sobrepasar los 100 metros de profundidad, tal es el caso de *Laminaria* encontrada a unos 120 metros en el Mediterráneo balear. (Armando et al., 2013)

Por otra parte, la absorción de luz es selectiva, en función de la energía de las radiaciones que constituyen el espectro de la luz solar. En consecuencia, las radiaciones de menor concentración de energía (mayor longitud de onda), esto corresponden al rojo, que va hacer absorbidas completamente por las capas más superficiales, que pueden llegar no más allá de los 10 metros. Por el contrario, las radiaciones verdes y azules (de mayor energía) son las que predominan en la composición de la luz a medida que aumenta la profundidad. (Casais, 2016)

Las Algas verdes, cuya pigmentación se da por predominar la región roja del espectro solar, donde se sitúan, en frecuente, en los niveles más superficiales. Las algas rojas, que utilizan las radiaciones verde-azules para la fotosíntesis, son más abundantes a mayor profundidad. Las Algas pardas ocupan, generalmente, niveles intermedios. (Gómez, 2013)

A pesar de ello, esta distribución cromática de las algas en relación con la profundidad no es absoluta. Existen numerosas excepciones producto de las interacciones de los distintos factores que intervienen en la fisiología de las mismas. Así, podemos encontrar Algas verdes que viven en profundidad mientras que existen numerosas Algas rojas adaptadas a vivir en la zona de influencia de las mareas. (Plaza, 2010a)

**La temperatura** es un factor preciso para las distribuciones de las macroalgas, siendo estas las temperaturas medias como la de las temperaturas altas, por lo que se



pueden distinguir varias zonas geográficas de vegetación ya sean estas la polar, boreal, templada, tropical, etc. En función va a tener una relación entre la conductividad y la temperatura del agua de mar. Estos van a tener como consecuencia al relacionado con la luminosidad donde marca los límites septentrionales o meridionales de su distribución de las algas en los medios océanos, 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.(Cañedo, 2015)

De tal manera que la distribución de las temperaturas del agua de mar en la superficie no sólo van a depender de la latitud, sino también por otros factores como es el caso de la corrientes marinas ya sean estas la frías o cálidas que mantienen itinerarios constantes, por lo que éstas pueden cambiar la estructura algal en las áreas en que ejercen su atribución. (Nikolaisen, 2012)

En general, los mares templados son los que demuestran una vegetación más excesiva, seguidos de los mares tropicales; donde los mares fríos son más pobres en especies bentónicas, aunque algunas especies (ciertas Feofíceas) alcanzan unos mayores tamaños.

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.(Gómez, 2013)

**La salinidad** del agua de mar expresa la cantidad de sales disueltas en un kilogramo de agua. El valor normal de las aguas superficiales para la mayor parte de los océanos se sitúa entre los rangos de 34 y 36 gramos por mil, siendo esto unos de los minerales disuelto en el agua del mar como es el cloruro sódico o sal común que es el componente mayoritario en este medio.(Velásquez, 2012)

Aunque las diferenciaciones de la salinidad pueden ser selectivas en cuanto a la disposición de algunas especies, no suelen excluir el aspecto de algas por extremas que sean. Donde existen algunas especies de algas que pueden habitar en un rango extenso de salinidad, tomando así el nombre eurihalinas, donde son propias de las zonas costeras

que emergen diariamente; aunque también existen algas que soportan mínimas variaciones de salinidad donde se la conocen como estenohalinas. Estos vegetales marinos han debido adaptarse a su fisiología y morfología para sobrevivir en el ambiente donde habitan. (González Severino, 2014)

**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  $0,02 \text{ mmol Kg}^{-1}$ . Los micronutrientes se encuentran en concentraciones desde  $0,5 \times 10^{-6} \text{ mmol Kg}^{-1}$ . (Bowles, 2007)

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. (Robledo Ramírez, 1993)

La captación de compuestos nitrogenados puede estar condicionada por su disponibilidad y por factores ambientales del momento.

El fósforo disponible puede regular la utilización del carbono inorgánico del alga cultivada a diferentes niveles de  $\text{CO}_2$ . 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  $\text{CO}_2$  tenían menor capacidad de utilización del carbono y mayor velocidad de captura de nitrógeno, comparado con los que crecían en  $\text{CO}_2$  ambiental. (Oilgae, 2006)

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. (Solís Bravo, 2007)

**El  $\text{CO}_2$**  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  $\text{CO}_2$  para el cultivo intensivo. Muchos estudios realizados sobre el cultivo de las algas han indicado que estas crecen más rápido en los ambientales de  $\text{CO}_2$  elevado. La elevación en la

concentración de este gas favorece el aumento del proceso de fotosíntesis y la producción de biomasa. (Cano Mallo, 2008)

(Basaure, 2011) encontró que hay efectos significantes en la producción de biomasa en el cultivo del alga marina roja, *Lomentaria articulata*, después tres semanas con concentración elevados de CO<sub>2</sub> desde 67 hasta 500% de la concentración ambiental. Al doble de este concentración del CO<sub>2</sub> ambiental, se observada producción de biomasa mayores del 52 y 314%.

(Nikolaisen, 2011) cultivó menta acuática durante cuatro semanas con concentración de 350 ppm y 3000 ppm de CO<sub>2</sub>. Las plantas que han sido cultivados en concentración de CO<sub>2</sub> de 3000 ppm produjeron 220 % más de biomasa.

El contenido en CO<sub>2</sub> total aumenta con la elevación de la temperatura, la salinidad, la precipitación del carbonato de calcio, y también con la respiración de los organismos. (Oilgae, 2006)

### **1.6 Uso de gases de combustión en el cultivo de macroalgas.**

La forma más ingeniosa de manejar un desecho es convertirlo en un recurso provechoso, el empleo de los gases de combustión como materia prima para el cultivo intensivo de macroalgas marinas encuentra su justificación en dicho planteamiento. Las algas marinas bentónicas o macroalgas, son vegetales que viven debajo del agua y cuyos procesos vitales están regidos por el equilibrio entre los procesos de fotosíntesis y respiración, en todas las costas del país es posible encontrar gran variedad de vegetación marina bentónicas, compuesta por macroalgas verdes, pardas y rojas.

Las algas son grandes consumidoras de CO<sub>2</sub> en su proceso metabólico característico de las plantas y que son como ellas reguladores naturales de este gas en el sistema ecológico del planeta, disminuyendo el efecto invernadero de dicho gas. Por tanto un ecosistema favorable con alto contenido de este gas disponible constituye una zona que estudiada y controlada se puede transformar en un área para la instalación de sistemas en ambiente natural de Biorreactores para el Cultivo Controlado de especies de macroalgas compatibles con las características marinas de la zona. (León, 2017)

Según (Rodriguez et al., 2012) el desarrollo de un proceso intensivo de Cultivo de las mismas para obtener de forma económicamente viable las cantidades necesarias para su

industrialización posterior requiere de zonas marinas y métodos de cultivo de algas efectivos que permitan producir a bajo costo las grandes cantidades que el desarrollo de la industria a partir de esta materia prima requiere para el autofinanciamiento de la inversión, contribuyendo de forma sostenible al control de la emisión del  $\text{CO}_2$  a la atmósfera.

(Roche, 2015)(Roche, 2015)(Roche, 2015)(Roche, 2015)(Roche, 2015)(Roche, 2015)(Roche, 2015) plantea que el  $\text{CO}_2$  necesario para el cultivo puede ser obtenido de los gases de combustión de procesos industriales como termoeléctricas, pero el  $\text{CO}_2$  debe ser separado de gases resultantes de la combustión. También se puede obtener este gas a partir de procesos fermentativos. Algunas corrientes de gases resultantes de los procesos industriales, tales como la purificación del gas natural y la producción de amoníaco, son sumamente puras desde un principio, mientras que otras no lo son.

En un cultivo de algas, entre un 20 y un 50% del  $\text{CO}_2$  suministrado es asimilado, mientras que el resto se pierde a la atmósfera. Por esta razón es ridículo pensar en el suministro de  $\text{CO}_2$  mediante botellas, ya que de esta manera el balance de emisiones siempre será positivo (a lo que habría que sumar las emisiones derivadas de la producción de  $\text{CO}_2$  para embotellar). Por tanto, es imprescindible suministrar al cultivo una fuente de carbono proveniente de focos de emisión ya establecidos, como los que se producen en las centrales térmicas, cementeras y otras actividades industriales.(Rios, 2016)

Temperature (°C)	$\alpha$ ( $\text{CO}_2$ )	$[\text{CO}_2]$ ( $\mu\text{M}$ in solution)
5	1.424	21.93
15	1.019	15.69
25	0.759	11.68
35	0.592	9.11

**Figura 1.3** Solubilidad del  $\text{CO}_2$ .

### **1.7 Modelación de sistemas de tratamiento de gases de combustión en Aspen.**

Existen ciertas características de los procesos industriales que las diferencian de otros tipos de industrias, debido esencialmente a que hay una compleja estructura de muchas etapas, cada una de las cuales consta a su vez de numerosos subcomponentes. Las ecuaciones que describen las relaciones entre las variables importantes oscilan desde unas muy sencillas hasta otras muy complicadas. Teniendo en cuenta que interviene un elevado flujo de materiales con un valor económico relativamente alto, por ello se comprende que pequeñas modificaciones en las características de diseño y operación pueden tener una importante repercusión económica. Las características de los subcomponentes del proceso todavía no son, en general, lo suficientemente bien conocidas como para permitir al ingeniero basar se exclusivamente en la teoría para proceder al diseño y control.

Es por ello que los ingenieros de las industrias de proceso se ocupan en dos principales tipos de trabajo: la operación de plantas ya existentes y el diseño de plantas nuevas o modificadas. Por lo que se refiere a la operación de instalaciones, tanto el control como la optimización constituyen las dos funciones más importantes de los ingenieros. Para que el ingeniero pueda desarrollar con eficiencia su trabajo en estos campos debe estar en condiciones de poder realizar un análisis sofisticado del proceso en sí. Será preciso programar los sistemas de cálculo de forma que se puedan combinar las relaciones que describen las partes individuales de la instalación; habrá que evaluar los parámetros básicos de estas relaciones, y, por último, será preciso dar un contenido más cuantitativo a los aspectos cualitativos de los criterios de que se dispone. Por éstas y muchas otras razones con ellas relacionadas, el control y optimización tienen su base fundamental en el análisis de procesos. El segundo tipo de trabajo de los ingenieros, que es el diseño, resulta en cierto modo más difícil. Por supuesto que los datos de la planta real no son conocidos de antemano, y, por esta razón, el ingeniero tiene que utilizar una parte importante de su criterio intuitivo. Por otra parte, cuando se modifican plantas existentes o se diseñan plantas similares a otras ya construidas, el ingeniero puede disponer de una importante experiencia. (MELOSEVICH and LLAXACONDOR, 2013)

De lo expuesto se llega a la conclusión de que la construcción de modelos matemáticos teóricos o semiteóricos constituye frecuentemente una necesidad preliminar. Tanto el diseño como la operación se pueden facilitar mediante la simulación del proceso o de sus

partes. En primer lugar, es muy difícil que la dirección de la empresa permita a los ingenieros introducir arbitrariamente cambios en una instalación que opera satisfactoriamente por el simple hecho de ver qué es lo que ocurre. Además los modelos matemáticos de los procesos se pueden manipular mucho más fácilmente que las plantas reales. Por ejemplo, se puede simular la operación fuera de las condiciones o intervalos normales y también se puede hacer “reventar” la planta con el fin de encontrar las condiciones de operación prohibidas. Para poder simular procesos podemos encontrar comercialmente muchos software, a continuación mostraremos algunos de ellos:

### **ProModel: Simulador De Procesos Industriales**

“**ProModel**” es un programa de simulación de procesos industriales, permite simular cualquier tipo de proceso de manufactura, además de procesos logísticos, procesos de manejo de materiales y contiene excelentes simulaciones de talleres, grúas viajeras, bandas de transporte y mucho más. En teoría, cualquier sistema de procesos puede ser modelado en computadora, solo se necesita de esfuerzo e ingenio, además de las herramientas que nos permitan plasmar nuestro pensamiento en un modelo computarizado. Una de esas herramientas es “**ProModel**”, en el cual se puede crear un modelo computarizado de todo proceso de manufactura y una vez realizado el modelado, se podrá simular sobre él una gran cantidad de situaciones como Justo a Tiempo, Teoría de Restricciones, Sistemas de Empujar y Jalar, Logística y muchas otras más. Además de permitir el simulado de acciones, nos enseña como optimizar los procesos en la misma, y así obtener los mejores con el consumo mínimo de recursos, para dicha tarea, el sistema cuenta con 2 optimizadores.(Follano, 2014)

### **HYSYS**

Simulador de Procesos HYSYS, utilizado fundamentalmente en la esfera industrial HYSYS es un programa interactivo enfocado a la ingeniería de procesos y la simulación, que se puede utilizar para solucionar toda clase de problemas relacionados con procesos químicos. Este simulador cuenta con una interfaz muy amigable para el usuario, además de permitir el empleo de operadores lógicos y herramientas que facilitan la simulación de diversos procesos. Fue adquirido por Aspen Tech en el 2004 por lo que es desarrollado en la actualidad por Aspen Technology. Es un simulador bidireccional, ya que el flujo de información va en dos direcciones (hacia delante y hacia atrás). De esta forma, puede

calcular las condiciones de una corriente de entrada a una operación a partir de las correspondientes a la corriente de salida sin necesidad de cálculos iterativos. Posee un entorno de simulación modular tanto para estado estacionario como para régimen dinámico. Es un software para la simulación de plantas petroquímicas y afines.(ESPINOSA, 2016)

### **Aspen Plus**

El Sistema Avanzado para Ingeniería de Procesos –Advanced Systemfor Process Engineering (ASPEN) es un mercado líder en herramientas de modelado de proceso de diseño conceptual, optimización y monitoreo de desempeño para la industria química, polímeros, especialidades químicas, metales y minerales.

Desarrollado en la década de 1970 por investigadores del Massachusetts Institute of Technology (MIT) y comercializado desde 1980 por una compañía denominada Aspen Tech. Aspen Plus es un simulador estacionario, secuencial modular (en las últimas versiones permite la estrategia orientada a ecuaciones). Actualmente es posible que sea el más extendido en la industria. Se ha utilizado para modelar procesos en industrias: química y petroquímica, refinado de petróleo, procesamientos de gas y aceites, generación de energía, metales y minerales, industrias del papel y la pulpa y otros. Aspen Plus tiene la base de datos más amplia entre los simuladores de procesos comerciales, e incluye comportamiento de iones y de electrolitos. Además modela y simula cualquier tipo de proceso para el cual hay un flujo continuo de materiales y energía de una unidad de proceso a otra. Posee herramientas para cálculos de costes y optimizaciones del proceso, generación de resultados en forma gráfica y en tablas y otros.(Armando et al., 2013)

### **Conclusiones parciales.**

1. Los gases de combustión presentan una amplia variedad de componentes aplicables en el cultivo intensivo de macroalgas marinas, en dependencia de la naturaleza del combustible, por lo que se hace necesario proponer un adecuado sistema para su tratamiento.
2. El método de tratamiento de los gases de combustión más adecuadas para su empleo como nutriente en el cultivo intensivo de macroalgas marinas, son los tratamientos de gases post-combustión.

- 
3. El software más adecuado para la evaluación mediante la simulación del esquema tecnológico seleccionado es el Aspen HYSYS por su versatilidad y su amplia base de datos de la industria química.
  4. El cultivo de macroalgas constituye una alternativa eficaz para la reducción del CO<sub>2</sub> de efecto invernadero, siendo los gases de combustión de las industrias una fuente con perspectivas de alcanzar una viabilidad técnico-económica y ambiental compatible.



## Capítulo 2: Selección del sistema de tratamiento de Gases de Combustión.

### Introducción al capítulo

El cultivo en tanques abiertos es el sistema más comúnmente utilizado para la producción de macroalgas marinas en tierra. Se suelen utilizar contenedores de diversos materiales y formas, siendo los más comunes los tanques rectangulares o de fondo cóncavo. Comúnmente, la agitación se logra utilizando aireadores, que mediante tuberías localizadas en el fondo del tanque, generan una circulación adecuada del agua y permiten la exposición periódica de las plantas a la luz en la superficie. (Robledo Ramirez, 1993)

Las macroalgas necesitan  $\text{CO}_2$  para su desarrollo, este gas puede ser suministrado desde una corriente de gases de combustión luego de ser tratados y acondicionados para su asimilación por las algas.

### 2.1 Descripción del proceso para cultivo intensivo de macroalgas (*Ulva Lactuca*).

El cultivo de macroalgas se realiza en 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 la bahía 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 compresor que inyecta aire a través de un aireador (distribuidor de aire), colocado de forma circular, con un flujo constante y que constituye el medio de agitación, proporcionando oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono al sistema. (Ríos, 2016).

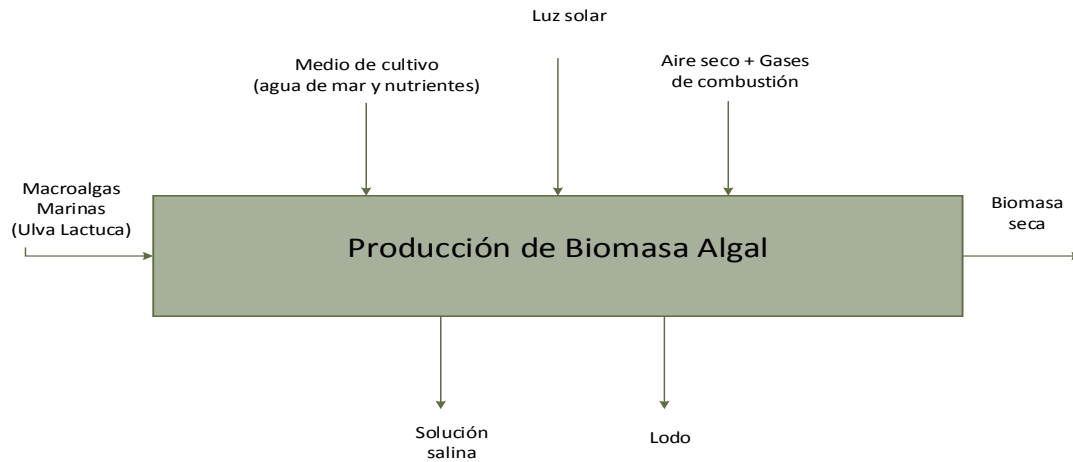
Como materia prima fundamental en este proceso se emplea la macroalga verde *Ulva Lactuca* (U.L) más conocida como lechuga de mar, debido a su fácil acceso, ya que predomina en las costas cubanas y el dióxido de carbono presente en los gases de combustión que salen la termoeléctrica. La **figura 2.1** muestra la función total del proceso.

Etapas del proceso

1. Obtención del alga en el laboratorio.
2. Preparación del medio acuoso.
3. Transporte de gases de combustión de la ETE.
4. Tratamiento de los gases de combustión.

5. Cultivo.

6. Secado.



**Figura 2.1** Función total del proceso de obtención de biomasa algal.

## 2.2 Etapas del proceso de cultivo de macroalgas.

El proceso consta de varias etapas:

Cultivo en el laboratorio: esta etapa consiste en un pre-cultivo a nivel de laboratorio hasta que las plántulas alcancen un tamaño promedio de 2 cm y sean trasladadas a los biorreactores para su cultivo industrial.

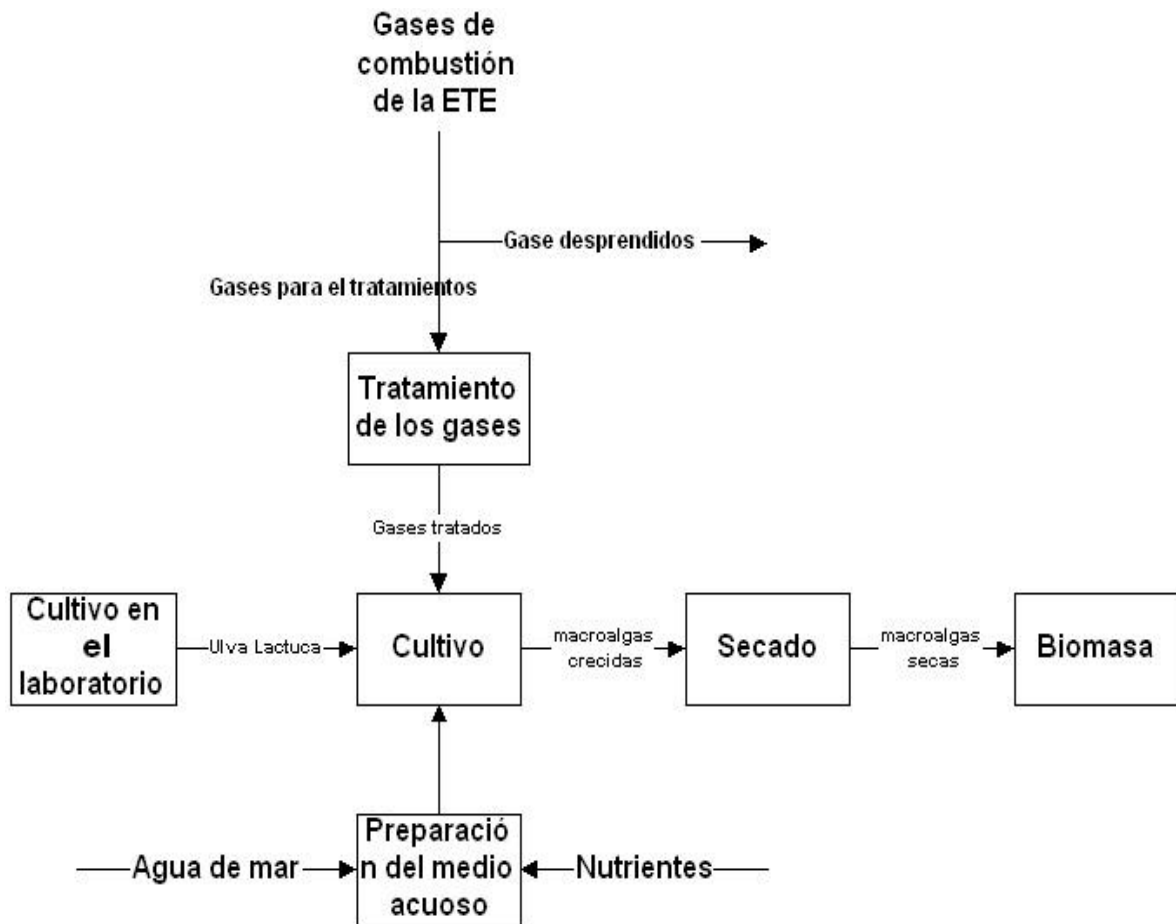
Acondicionamiento del medio acuoso: consiste en un tratamiento de limpieza previo al agua de mar mediante filtros, garantizando flujos de agua de acuerdo a la capacidad de dicha planta y finalmente se añaden los nutrientes necesarios para el cultivo de las macroalgas.

Transporte de los gases de combustión: se realiza con el objetivo de llevar a la planta una corriente de gases de la ETE, ricos en sustancias como CO<sub>2</sub>, Nitrógeno y Oxígeno componentes necesarios para el cultivo de las macroalgas.

Tratamiento de los gases: esta etapa se realiza con el objetivo de tratar los gases de la termoeléctrica para su utilización en el proceso de obtención de biomasa algal. Estos gases se burbujan en una columna de agua a temperatura ambiente donde se enfrían hasta 30°C y se eliminan partículas sólidas presentes en los mismos y otra etapa de eliminación de compuestos no adecuados para el cultivo.

**Cultivo:** cuenta con 75 Biorreactores, dividido en 5 sectores de 15 biorreactores cada uno, tipo tanque abierto. Los reactores se mantienen con un flujo de gas y agua de mar con un ciclo de renovación de 12 horas similar al llenado y vaciado de la bahía. Los gases de combustión de la ETE Cienfuegos se suministran a través de distribuidores de aire, colocados a lo largo de cada reactor.

**Secado:** esta etapa se realiza en secaderos solares tipo invernadero con el objetivo de obtener una biomasa seca de macroalgas para su posterior comercialización.



**Figura 2.2.** Diagrama de bloques del proceso de cultivo.

### 2.3 Sección de tratamiento de gases de combustión.

La sección de limpieza de los gases de combustión consta de tres etapas u operaciones, mediante las cuales son acondicionados los gases de combustión de la ETE “Carlos Manuel de Céspedes” para emplearlos como fuente fundamental de CO<sub>2</sub> y, a su vez, reducir la

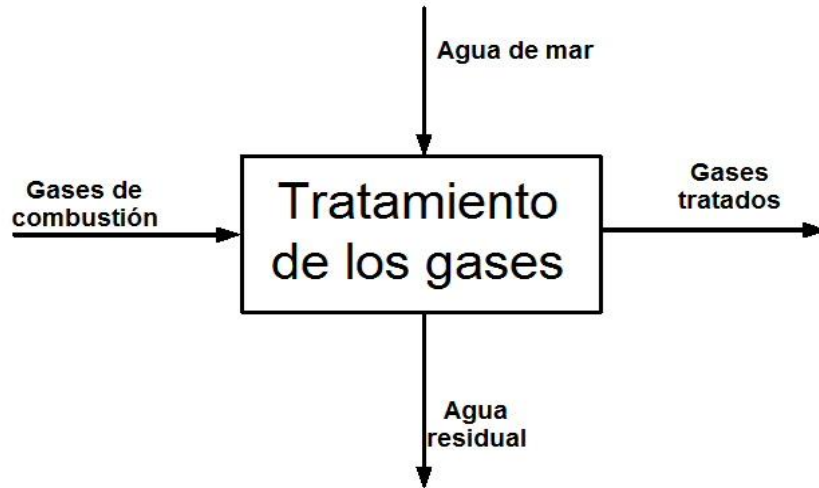
adición de otros aditamentos necesarios en el cultivo intensivo de macroalgas marinas. Estas etapas son:

Transporte de los gases de combustión: son transportados desde la ETE mediante un sistema de tuberías con pendiente y auxiliada por ventiladores ubicados a distancias determinadas de manera eficiente para transportar el flujo necesario para la planta de cultivo.

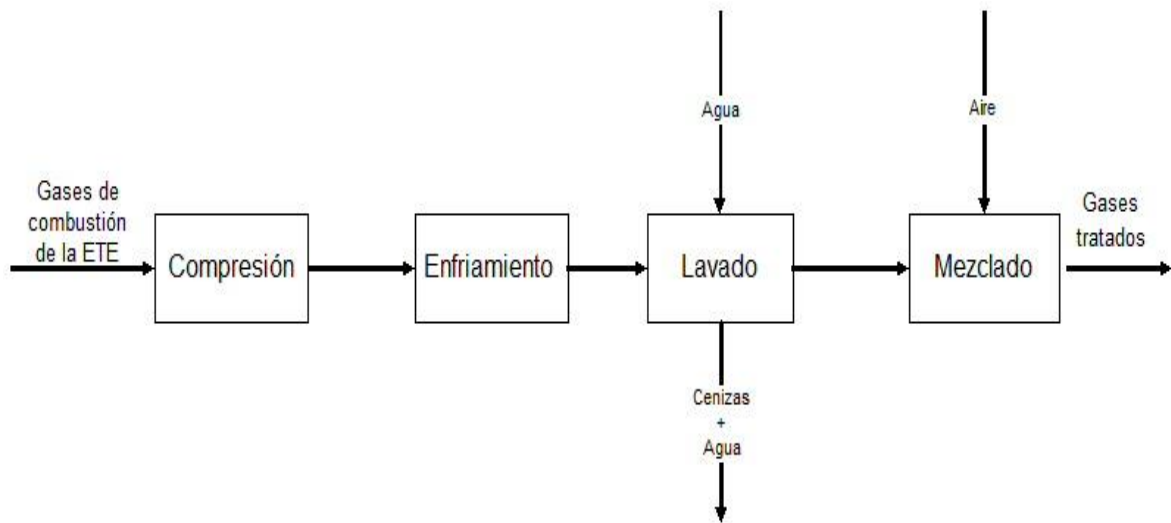
Enfriamiento de los gases: los gases salen de la ETE a temperaturas cercanas a los 350°C por lo que se hace necesario enfriarlos antes de su tratamiento. Esta etapa puede ser realizada mediante un intercambiador de calor de tubo y coraza o uno de doble tubo, también es posible emplear poco aislamiento en las tuberías de transporte de la etapa anterior de manera que las pérdidas totales de calor sean las adecuadas para garantizar la temperatura deseada para la siguiente etapa.

Tratamiento de los gases: el objetivo de esta etapa es el acondicionamiento de los gases mediante su lavado con agua para arrastrar cualquier material particulado (fundamentalmente cenizas) y puesto en contacto con un selectivo que elimine por absorción con reacción química los elementos que puedan traer efectos negativos para el cultivo de las macroalgas. Esta etapa puede llevarse a cabo con una torre donde sea puesto en contacto directo una solución que contenga el solvente necesario y los gases de combustión. Por otro lado es posible el empleo de un tren de lavado donde las operaciones son divididas, o sea, una torre de rociado con agua para el material particulado y otra torre para la absorción.

Acondicionamiento final de los gases: adicionar una corriente de aire, para alcanzar los niveles de oxígeno requeridos para el crecimiento de las macroalgas. La presión debe ser suficiente para superar las resistencias que ofrece el distribuidor de gases reportado por (Ríos García, 2016)



**Figura 2.3** Función total de la sección de tratamiento de los gases de combustión.



**Figura 2.4** Diagrama de bloques de la sección de tratamiento de los gases de combustión.

#### **2.4 Simulación de las distintas alternativas de operación.**

Para la simulación de la sección de limpieza de los gases de combustión se empleó el software Aspen HYSYS V8.0. Fue simulada una caldera de la termoeléctrica empleando un reactor de conversión (furnace), un mezclador e intercambiador de calor de tubo y coraza (boiler), para obtener la composición de los gases de combustión que luego son comprimidos, enfriados y puestos en contacto directo con agua para ser lavados de sustancias sólidas en suspensión.

El software requiere de un listado de las sustancias necesarias para la simulación del proceso. En este caso fueron introducidas 11 sustancias puras, de ellas solo hay una sustancia hipotética, ya que el resto se encontraba en la biblioteca del software. A continuación se ofrece un listado de las sustancias:

Source Databank: HYSYS		
Component	Type	Group
Carbon	Pure Component	
CO2	Pure Component	
Oxygen	Pure Component	
Nitrogen	Pure Component	
NO2	Pure Component	
H2O	Pure Component	
Hydrogen	Pure Component	
SO2	Pure Component	
S_Rhombic	Pure Component	
NaSo3*	User Defined Hypothetic	HypoGroup1
NaOH	Pure Component	

**Figura 2.5** Sustancias introducidas en el software.

En el caso del  $\text{NaSO}_3$  fueron necesarios los datos de su peso molecular y su densidad ( $\text{kg/m}^3$ ). Los demás valores de sus propiedades fueron estimados por el propio software.

Dentro del grupo de las ecuaciones de estado, las más usadas y que mejor predicen el comportamiento de las mezclas líquido-gaseosas de este tipo son la ecuación de Peng-Robinson (PR) y la ecuación de Soave-Redlich-Kwong (SRK), y particularmente la primera de ellas. Ambas fueron desarrolladas de forma explícita para cálculos de equilibrio vapor/líquido.

El paquete de propiedades seleccionado fue el Peng-Robinson; debido a que dentro del grupo de las ecuaciones de estado, las más usadas y que mejor predicen el comportamiento de las mezclas líquido-gaseosas de este tipo son la ecuación de Peng-Robinson (PR) y la ecuación de Soave-Redlich-Kwong (SRK), y particularmente la primera de ellas. Ambas fueron desarrolladas de forma explícita para cálculos de equilibrio vapor/líquido. (Khellaf, 2016)

La ecuación de Peng-Robinson (1) es la más ampliamente usada en termodinámica de Ingeniería Química. Se sabe que proporciona unas predicciones mejores para densidades de

líquidos que la ecuación de Soave-Redlich-Kwong por Suave (1972). La ecuación requiere el uso de tres propiedades por compuesto puro:  $T_c$ ,  $P_c$  y el factor acéntrico  $\omega$ .

La ecuación de estado (EDE):

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a(T)}{v^2 + 2bv - b^2} \quad (1)$$

Los parámetros del componente puro para la EDE se muestran en las ecuaciones (2), (3), (4), (5) y (6):

$$a(T) = a(T_c) \cdot \alpha(T_r, \omega) \quad (2)$$

$$a(T_c) = 0,45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (3)$$

$$\alpha(T_r, \omega) = \left(1 + \kappa(1 - \sqrt{T_r})\right)^2 \quad (4)$$

$$\kappa = 0,37464 + 1,54226\omega - 0,26992\omega^2 \quad (5)$$

$$b = 0,0778 \frac{RT_c}{P_c} \quad (6)$$

Se añadieron dos set de reacciones (**Tabla 2.1**), un set para el reactor de conversión, que cumple el papel de quemador del combustible, y el otro para el reactor de conversión, que sería la torre con absorción con reacción química. Los valores del coeficiente estequiométrico de los productos fueron calculados empleando la opción de balance del Aspen HYSYS. Cada set cuenta con las reacciones que se tabulan a continuación:

**Tabla 2.1** Reacciones presentes en la simulación.

Set	Número de la reacción	Reacción
<b>1</b>	1	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
	2	$O_2 + 2 H_2 \rightarrow 2H_2O$
	3	$O_2 + S \rightarrow SO_2$
	6	$O_2 + N_2 \rightarrow 1.3NO_2$
<b>2</b>	4	$NaOH + SO_2 + H_2O \rightarrow 4H_2 + 0,905NaSO_3$

Se tuvo en cuenta que la reacción 6 es favorecida a temperaturas superiores a los 1200°C, por lo que se decidió darle un coeficiente de conversión muy bajo, en el orden del 1%. En el caso de la reacción 1 el coeficiente empleado fue del 90% para acercarnos lo más posible a lo real. No se tuvo en cuenta la formación de CO, pues la alimentación de oxígeno fue con el exceso requerido para evitar la formación de este gas en cantidades apreciable que pudiera afectar el proceso de cultivo intensivo de macroalgas marinas.

Los datos de flujo de las corrientes de entrada fueron tomados de la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”, así como los demás parámetros que fueron necesarios para la simulación de la parte del proceso para determinar la composición de los gases de combustión de la ETE. Los valores de las corrientes de entrada y los resultados obtenidos se muestran en las **tablas 2.2 y 2.3**.

**Tabla 2.2** Composiciones de aire y combustible para la simulación.

Composición Mole Frac	Aire	Combustible
Carbón	0	0.85
CO2	0	0
Oxígeno	0.21	0.001
NO2	0	0
Nitrógeno	0.79	0.001
H2O	0	0
Hidrogeno	0	0.118
SO2	0	0
S	0	0.03

**Tabla 2.3** Datos de operación del proceso de combustión de la ETE.

Corrientes	Unidades	Combustible	Gases de combustión	Aire
Temperatura	C	50	359.999979	537.777778
Flujo Molar	kg/h	36500	636497.323	600000

### 2.5 Selección de la alternativa de operación mediante la simulación.

Se analizaron dos alternativas de operación, la alternativa 1 con el uso de una columna de lavado y una de absorción con reacción química empleando una solución de NaOH (**figura 2.6**), y la alternativa 2 con el uso de una única columna de lavado con agua (**figura 2.7**). Los datos de las composiciones finales se muestran en la **tabla 2.4**.



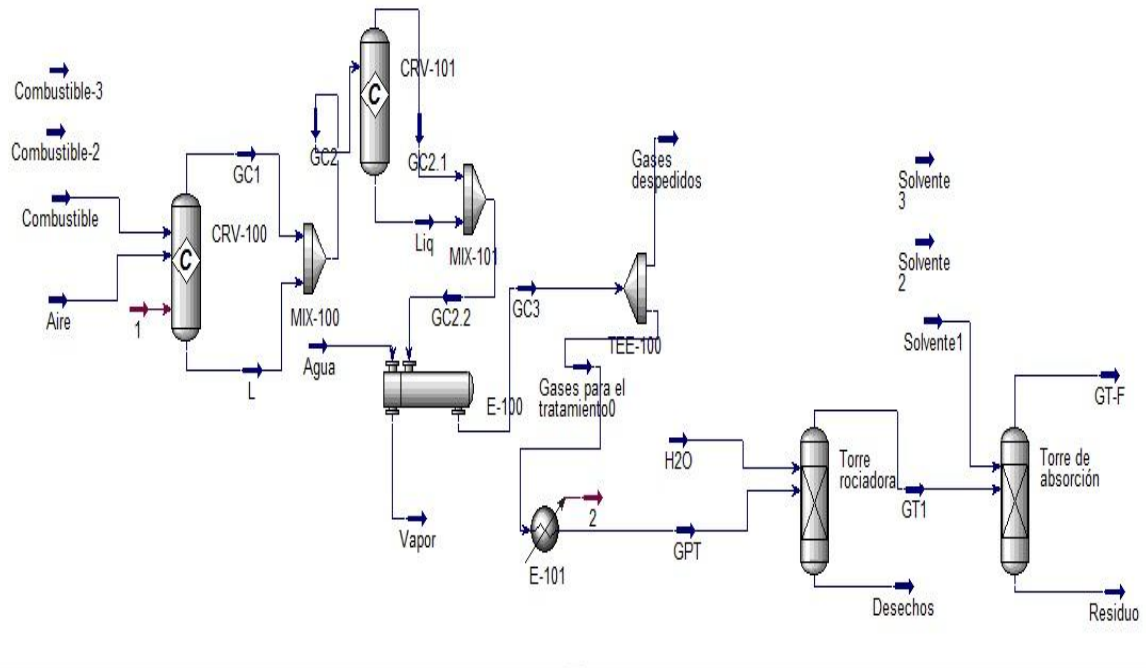


Figura 2.6 Alternativa 1 para el tratamiento de los gases.

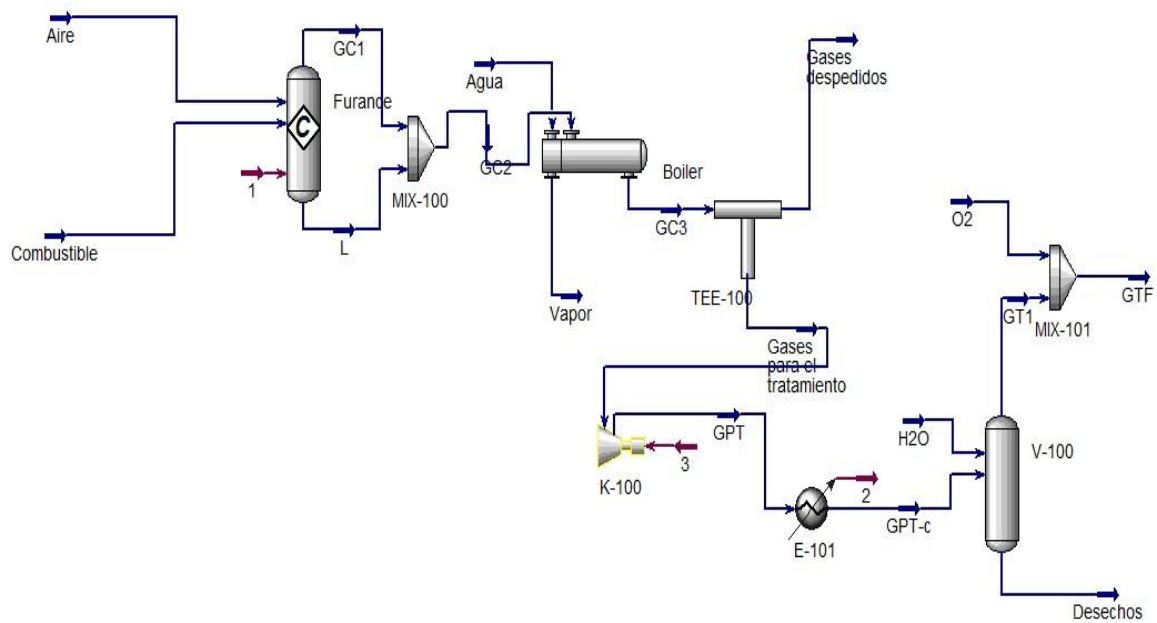


Figura 2.7 Alternativa 2 para el tratamiento de los gases.

Ambas alternativas fueron simuladas y los datos de las corrientes de salida del proceso de limpieza se muestran a continuación.

**Tabla 2.4** Composición de los gases tratados.

Componentes de los gases	Composiciones ( Fracción Molar)	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Carbón	0	0
CO <sub>2</sub>	0.1532	0.108785
Oxígeno	0	0.084176
NO <sub>2</sub>	0	0.000945
Nitrógeno	0.74	0.768858
H <sub>2</sub> O	0.047	0.029628
Hidrogeno	0.059	0.003356
SO <sub>2</sub>	0	0.004252
S	0	0
NaSo <sub>3</sub> *	0.0915	0
NaOH	0.000568	0

Al analizar los datos obtenidos mediante la simulación, la composición de los componentes de los gases de combustión que son capaces de alterar el cultivo de las macroalgas (SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>) no alcanzan niveles superiores a los reportados por (León, 2017) como niveles permisibles de captación por parte de las macroalgas. Por esta razón se decide mantener solamente en la propuesta tecnológica una torre de lavado de gases tipo burbujeo con agua de mar, además en esto influye que el empleo de las dos torres implica mayores gastos en equipamiento y materias primas; y por tanto encarece el costo de la instalación y producción de la planta de cultivo.

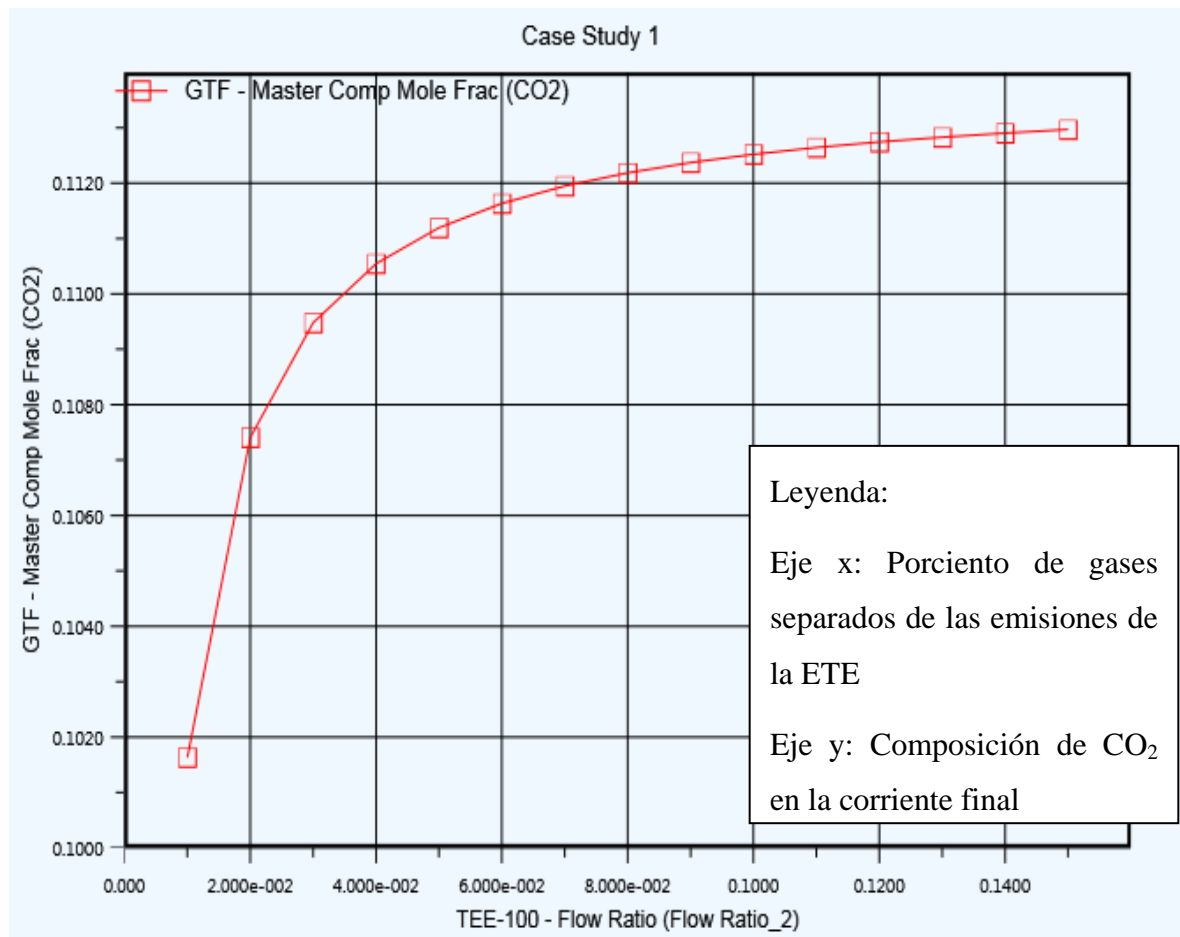
## 2.6 Evaluación de la alternativa de operación mediante la simulación.

Una vez seleccionada la alternativa de operación se evalúan distintos parámetros de la misma que influyen en la composición de salida del CO<sub>2</sub> del sistema de tratamiento de los gases.

Con la ayuda de los casos de estudios se analiza el comportamiento de variables dependientes como la composición del CO<sub>2</sub> a la salida del sistema de tratamiento al realizar

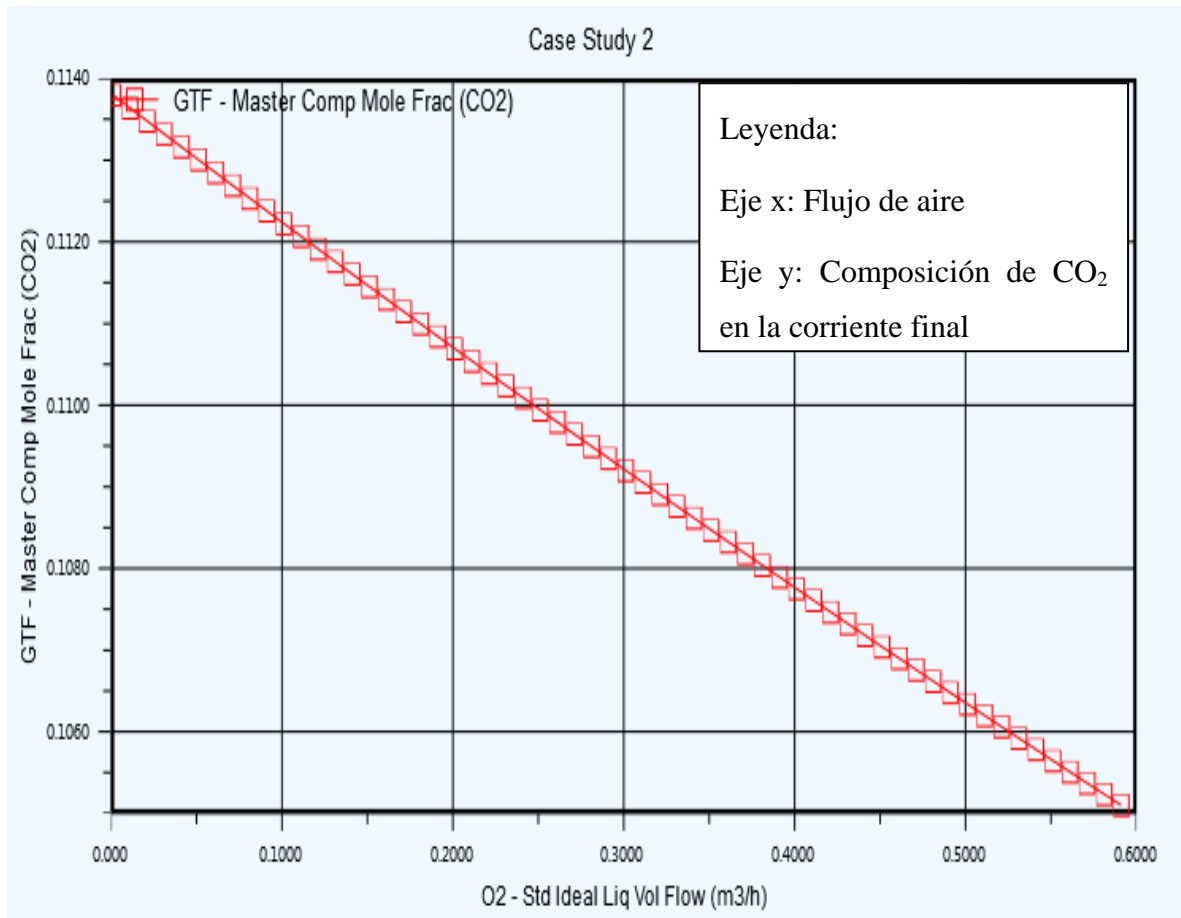
cambios en variables independientes como la relación de separación de los gases a la entrada del proceso y el flujo de aire necesario para mantener una estabilidad en la concentración del  $\text{CO}_2$ .

Al analizar la relación existente entre la cantidad de gases de combustión que son empleados en la planta de cultivo con el por ciento de  $\text{CO}_2$  presente en los gases como se muestra en el caso de estudio 1 de la **figura 2.8**; se determina que a valores de separación mayores a un 15%, los gases de combustión mantienen una concentración estable de 0,112 fracción molar. Esto permite mantener una estabilidad en el proceso de crecimiento de las macroalgas, pues este gas influye en el aumento de la acidez del medio de cultivo de la misma y permite realizar un aumento de la cantidad de gases de combustión adicionados al proceso sin alterar la evolución del mismo.



**Figura 2.8** Resultados del caso de estudio.

En el caso de estudio 2 (**figura 2.9**) se analiza la influencia del flujo de aire adicionado a la corriente gaseosa con la composición de CO<sub>2</sub> para determinar el flujo de aire a añadir al proceso para disminuir la concentración de CO<sub>2</sub> hasta un 11% en los gases que son suministrados a los biorreactores para el desarrollo de las macroalgas según (Arias, 2017).



**Figura 2.9** Resultados del caso de estudio 2.

El análisis demuestra que un aumento en el flujo de aire disminuye drásticamente la composición del CO<sub>2</sub> de los gases tratados. Además permite determinar que es necesario un pequeño flujo de aire, en el orden de los 0,2 m<sup>3</sup>/h para lograr las condiciones necesarias para el cultivo intensivo, por lo que se necesita establecer un control específico entre relación entre el flujo de aire y el flujo de gases de combustión tratados para mantener una concentración de CO<sub>2</sub> estable en la entrada a los biorreactores, para mantener así una estabilidad del cultivo.

## **2.7 Diseño y/o selección del equipamiento para la sección de tratamiento de gases de combustión.**

La alternativa tecnológica propuesta para la sección de limpieza de gases de combustión en el proceso de cultivo intensivo de las macroalgas marinas consta de una torre de intercambio gas líquido de burbujeo como equipo principal y un sistema de tuberías y equipos auxiliares como tanque, bomba, compresor y ventilador para el manejo de los componentes del proceso.

### **2.7.1 Selección del sistema de limpieza de gases de combustión.**

En la etapa del proceso de acondicionamiento de los gases de combustión es necesaria una limpieza que elimine toda el material particulado (MP) presente en los mismos para su posterior transporte hacia los tanques de cultivo de macroalgas.

El funcionamiento de un determinado tipo de torre de limpieza es altamente dependiente de la distribución de tamaño del en la corriente gaseosa. La carga del MP, también llamada carga de polvo, es la masa de MP por unidad de volumen en el gas residual a la entrada a la torre de limpieza.(Elisa, 2000)

Para la operación de limpieza de los gases de combustión existen variantes de diseño de sistemas de lavado,(Cobelas, 1989) utiliza un sistema de tipo “abierto” que a su vez enfría los gases hasta la temperatura requerida, a través del cual el agua a utilizar para la limpieza se toma desde el mar.

Los parámetros de diseño del equipo (columna de borboteo) para el tratamiento de los gases de combustión se determinan a través del software Aspen HYSYS. Los resultados obtenidos se muestran en la **figura 2.10**.

Sizing Results	
Diameter [m]	0.6000
Total Length [m]	4.200
L/D Ratio	6.500
Max. Allow. Vap. Velocity [m/s]	0.8844
Demister Thickness [mm]	-0.0000
Liq. Residence Time [seconds]	000:05:0.00
Liq. Surge Height [m]	2.162
LLSD [m]	0.4572
Liq. Res. Time at LLSD [seconds]	000:00:57.83

**Figura 2.10** Dimensionamiento de la torre.

Teniendo en cuenta los valores obtenidos la torre seleccionada (Pfafflin, 2010) se presenta en el Anexo F.

### 2.7.2 Selección de la bomba centrífuga para el agua de la torre.

En la etapa de limpieza de los gases de combustión se utiliza una bomba centrífuga para cada torre, con el objetivo de transportar el agua y el solvente requeridos hasta las torres de lavado y de absorción. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

En su estudio preliminar (Arias, 2017) realizó el balance de energía para determinar el flujo de agua para enfriar los gases de combustión, obteniendo un flujo de 7 898 L/h. Teniendo en cuenta estos resultados se calculó la carga de la bomba a través de un balance de energía mecánica obteniendo los resultados expuestos a continuación.

**Tabla 2.3:** Parámetro para selección de la bomba centrífuga

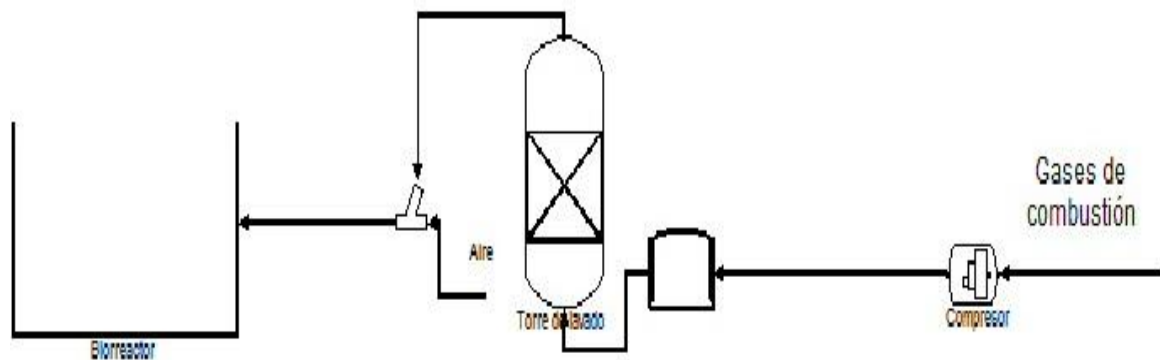
Parámetro	Datos	Ecuación	Resultados
$H$	$Q=0.002\text{m}^3/\text{s}$ $L=20\text{m}$ $v=1.1\text{m/s}$ $DN=0.1524\text{m}$	$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\alpha \Delta V^2}{2g} + h_{pt}$	$H= 5,2 \text{ m}$

	$f=0.021$ $\Delta z=5m$ $\Delta P=0$ $\Delta v=0$		
--	--	--	--

Para este flujo de agua de 7,2 m<sup>3</sup>/h se selecciona una bomba modelo STH 32-125B con una potencia de 1,1 KW en el catálogo Bloch, para datos técnicos ver Anexo E.

**2.7.3 Selección del compresor del sistema de transporte de los gases.**

Para la selección del compresor se tuvo en cuenta los valores reportados por (Ríos, 2016) de la caída de presión en el distribuidor de gases diseñado por él. Además de la caída de presión en la torre y las tuberías del sistema mostrado en la figura.



**Figura 2.11** Diagrama del sistema de transporte de los gases de combustión.

Para una presión de 0,6 MPa se seleccionó un compresor comercializado por (www.alibaba.com), de la serie LGCY-10/7. (Ver anexo C).

**2.7.4 Diseño del tanque para agua de mar.**

**Tabla 2.4. Dimensionamiento del tanque colector para recirculación.**

Datos	Ecuaciones	Resultados	Referencias
Mmezcla=7891 kg	$D=(4*V)/(\pi*H/D)^{(1/3)}$	D=12 m	Rosabal, J.(1985)
$\rho_{mezcla}= 1027 \text{ kg/m}^3$	$h = 0.38.D$	h =4.6 m	
V=7.7 m <sup>3</sup> H/D=0.38 H =5% sobrediseño	$H = h + 0.05h$	H = 5 m	

Como el volumen del tanque es de 7700L y suponiendo que este es de forma cilíndrica y una altura de 5m el diámetro de este es de 12 m

### 2.8 Propuesta de control automático para el sistema de tratamiento de gases.

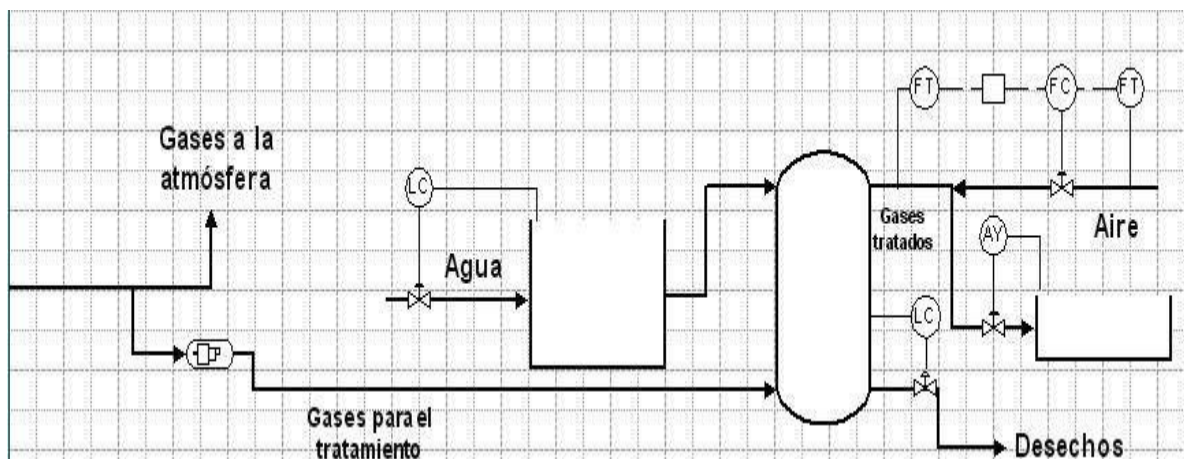
La propuesta de control automático para la sección de limpieza de los gases de combustión fue realizada teniendo en cuenta las principales parámetros de control. Para los equipos que presentan acumulación se propone un control de inventario mediante medidores de nivel. En el caso de los biorreactores se propone un control simple con medidores de concentración para mantener estabilidad en el pH, este control debe ser riguroso sobre todo el comienzo del cultivo pues es la etapa de más sensibilidad a cambios en la acidez del medio de cultivo. Para mantener una concentración de CO<sub>2</sub> del 11% se precisa de un control de relaciones entre las corrientes de aire y los gases tratados, como muestra la **figura 2.12**; para establecer esta relación es necesario conocer la relación (R) entre las corrientes, ecuación (7).

$$\%CO_2 * F_{ga} = \%CO_2 * F_a + \%CO_2 * F_m \quad (7)$$

Donde:

- %CO<sub>2</sub>: por ciento de CO<sub>2</sub> en las corrientes
- F<sub>ga</sub>: flujo de gases tratados
- F<sub>a</sub>: flujo de aire
- F<sub>m</sub>: flujo de gases que son alimentados a los biorreactores.

**Figura 2.12.** Propuesta de control automático





### Conclusiones parciales

1. Del análisis de las alternativas tecnológicas para la limpieza de los gases de combustión se seleccionan dos alternativas, una incluye el uso de dos columnas, la primera de lavado y absorción con reacción química, y la otra alternativa consta de una única torre de lavado con agua (columna de borboteo).
2. Con la evaluación de las alternativas propuestas mediante la simulación se determina que el uso de una columna de lavado es la alternativa más adecuada para la limpieza de los gases de combustión debido a que los componentes nocivos para la macroalgas (material particulado,  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ ) se encuentran en límites permisibles.
3. Al analizar el porcentaje de gases tomados de la ETE respecto a la concentración final de  $\text{CO}_2$  de los gases tratados mediante el empleo de casos de estudio se evidencia que la composición se mantiene estable en un 11 % a partir de un 15 % de separación lo que permite el sostenimiento de la estabilidad en el proceso.
4. Para la determinación del flujo de aire adicionado a los gases de combustión para su acondicionamiento se emplea un caso de estudio donde se analiza que el flujo de aire debe ser de  $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$  para mantener la composición final de  $\text{CO}_2$  de los gases tratados en un 11 %.
5. Con el empleo del complemento de diseño del Aspen HYSYS se obtiene la altura de 4,2 m, el diámetro de 0,6 m y el tiempo de residencia del líquido de 300 s como los parámetros de diseño fundamentales del equipo de limpieza.
6. Como propuesta de control automático se emplea un regulador de relaciones para los flujos de aire y gases tratados, un control de concentración para mantener el pH en los biorreactores y los controles de inventario necesarios en los equipos que presentan acumulación.

## Capítulo 3: Análisis técnico-económico para la instalación. Evaluación ambiental.

### Introducción al capítulo

Para garantizar la rentabilidad de una instalación de este tipo la viabilidad de su ejecución se debe dirigir fundamental al empleo de la biomasa obtenida como materia prima para la obtención de productos de alto valor agregado como biocombustibles.

La evaluación económica incluye la estimación de costo de inversión, del costo de producción, ganancia y un análisis de la rentabilidad de la inversión, mediante la determinación de los indicadores dinámicos de rentabilidad: Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno, Período de Recuperación de la Inversión (VAN, TIR, PRD), con el objetivo de proponer el presupuesto para la instalación de la planta.

### 3.1 Estimación del costo del equipamiento para la instalación de cultivo intensivo de macroalgas marina.

La actualización de los costos de los equipos se realiza mediante el método de escalado del costo, utilizando los índices de costos de Ingeniería Química, conocido por Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) para el costo original y actual del equipo respectivamente, cuyos resultados se muestran en la **Tabla 3.1**.

La estimación del costo de inversión se realiza aplicando el método del por ciento del costo de equipamiento (Peters, 1991), cuyos resultados se muestran en la **Tabla 3.4**.

**Tabla 3.1** Estimación del costo de equipamiento.

Equipos	No equipos	Costo (USD)	Costo total(USD)
Reactor	75	900	675000
Compresor de gases	1	14500	14500
Bomba para agua	1	1780	1780
Bomba centrífuga	5	5000	25000
Filtro parabólico	5	3200	16000
Tanque para agua	1	2000	2000
Lavador de gases	1	20000	20000

Compresor de aire	43	30000	1290000
Secadero solar	5	30000	150000
<b>Costo total del equipamiento</b>			1668560

Para la actualización de los costos se emplea la ecuación:

$$\text{Costo actual} = \text{Costo original} * \frac{\text{índice actual}}{\text{índice original}}$$

Índice de Costo Ingeniería Química:

I.C. 2016 = 541,7

I.C. 2018 = 572,9

Los costos de los equipos que no pertenecen a la sección de tratamiento de los gases de combustión fueron tomados de (Ríos, 2016).

**Tabla 3.2** Costo actualizado del equipamiento.

No.	Nombre	Costo actualizado, \$/año
1	Bomba centrífuga	39660,00
2	Biorreactor	71388,00
3	Secadero	158639,00
4	Filtro	16922,00
Costo total del equipamiento(actualizado incluyendo todos los equipos)		394168,00

### 3.2 Estimación del costo de inversión.

Los costos de inversión se calcularon teniendo en cuenta la información actualizada referida a la sección de tratamiento de gases de combustión y tomando los demás valores de los reportados por (Ríos, 2016) en su propuesta de la planta de cultivo intensivo de macroalgas marinas. Para el cálculo fue empleado el método de (Peters, 1991)

**Tabla 3.3** Estimación del costo de inversión basado en el costo del equipamiento (Peters, 1991)

Componente	Por ciento del costo de equipamiento para planta de proceso sólido - fluido	Costo actualizado
<b>Costos Directos</b>		
Equipamiento adquirido	100	394 168,00
Instalación del equipamiento adquirido	39	119687,00
Instrumentación y controles	13	39895,50
Tuberías	31	95135,50
Electricidad	10	30688,90
Edificaciones	29	88997,7
Mejoramiento de terreno	10	30688,00
Instalaciones de servicio	55	168789,00
Compra de terreno	6	18413,3
Costo directo total		899148,00
<b>Costos Indirectos</b>		
Ingeniería y supervisión	32	98204,40
Gastos de construcción	34	104342,00
Costos directos e indirectos totales		202547,00
Contratos	5	55086,50
Imprevistos	10	110173,00
<b>Costo fijo de inversión</b>		<b>1266989,00</b>

**3.3 Estimación del costo de producción.**

Para la estimación del costo total de producción se utilizaron los factores de proporción y las ecuaciones correspondientes a la tabla 27(Peters, 1991).

$$\text{CTP} = \text{Costo de fabricación (CF)} + \text{Gastos Generales (GG)}$$

$$CF = CD + \text{Cargos Fijos } (C_{\text{Fijos}}) + CI$$

$$\text{Depreciación} = \frac{CFI - VR}{Vd}$$

- VR es el valor residual que se asume igual a cero y Vd es la vida útil igual a 15 años.

**Tabla 3.4.** Cálculo de CD (Peters, 1991)

	%	Costo(USD)
Materia prima	-	89670
Mano de obra	10 %CTP	0,1*CTP
Supervisión	15 % Mano de obra	0,15*MO
Requerimientos	20 %CTP	0,2*CTP
Mantenimiento y reparación	2 %CFI	25340,00
Suministro	0,5%CFI	6335,00

**Tabla 3.5.** Cálculo de CI

Costo Indirecto	5% CTP	0,05*CTP
-----------------	--------	----------

**Tabla 3.6.** Cálculo de Cargos Fijos

Depreciación		633349,50
Impuestos	1 %CFI	12670,00
Seguros	0.4 % CFI	5068,00
<b>Cargos fijos</b>		<b>81087,34</b>

**Tabla 3.7.** Cálculo de GG

Administrativos	2 % CTP	0,02CTP
Distribución y ventas	2 %CTP	0,02CTP
Investigación y desarrollo	5 %CTP	0,05CTP
<b>Gastos generales</b>		<b>0,09CTP</b>

$$CTP = 121344,70 + 0,315CTP + 81087,34 + 0,05CTP + 0,09CTP$$

$$CTP = 202432,04 / (1 - 0,455)$$

$$CTP \text{ de la instalación (USD/año)} = 368058,25$$

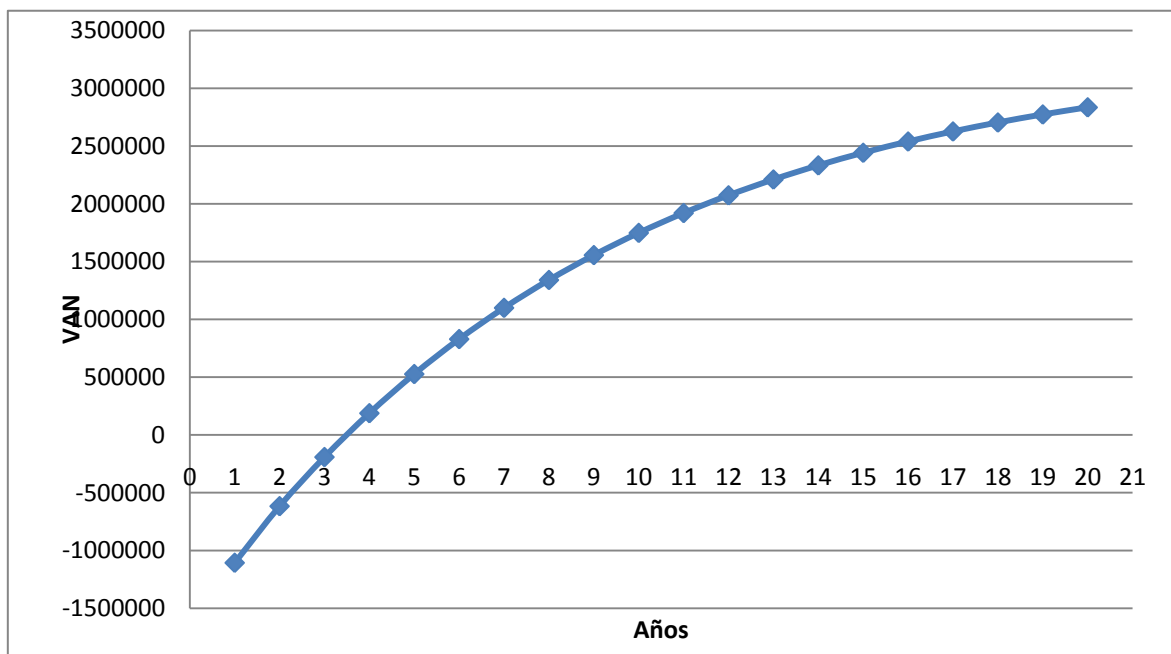
### 3.4 Análisis de Rentabilidad.

Se analiza la rentabilidad del proceso con los cambios propuestos en la sección de tratamiento de los gases. Con el análisis de la etapa se redujo el número de columnas propuestas anteriormente por (Molina, 2017). Los cálculos de rentabilidad se realizaron para la planta con una capacidad basada en que toma el 1% de los gases de combustión de la ETE y una concentración de CO<sub>2</sub> del 11% en los gases tratados. La **tabla 3.8** muestra los resultados de los indicadores

**Tabla 3.8.** Resultados del análisis dinámico de rentabilidad.

<b>VAN</b>	<b>\$862607,82</b>
<b>TIR</b>	<b>36%</b>

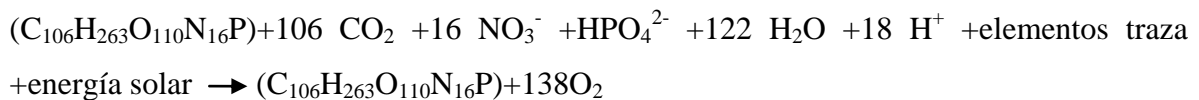
El período de recuperación al descontado tiene un valor de 3,3 años. Los resultados se muestran en la **figura 3.1**.



**Figura 3.1.** Resultado del tiempo de recuperación de la inversión de la planta piloto del cultivo intensivo de macroalga marina *Ulva Lactuca*.

### 3.5 Análisis preliminar de los beneficios ambientales de la instalación

Considerando que el flujo de gases de combustión procesado de 152 759,35 kg /día con un 11,58 % peso CO<sub>2</sub> correspondiente al 1 % del flujo total de gases de combustión de la ETE C.M. Céspedes, y los índices de rendimientos del cultivo intensivo reportados en estudios experimentales de (0,8 kg/d b.s.)(Roche, 2015), y con condiciones de operación de (1,972 litros de agua /g de gas)(García, 2008), y sobre la base de la reacción que descrita del proceso de fotosíntesis de las algas, según(Casais, 2016):



Se procedió a determinar de forma preliminar los beneficios ambientales que proporciona la instalación propuesta, para el cultivo intensivo de *Ulva Lactuca* con una posible ubicación en las cercanías de la Termoeléctrica. La remoción de CO<sub>2</sub> es 848 t/ año, lo que representa unas 166 t/año de combustible que es quemado pero no emite CO<sub>2</sub> a la atmósfera, confirmando que este cultivo intensivo es una alternativa muy eficaz para reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

#### Conclusiones parciales

1. La inversión para la instalación de la planta de cultivo intensivo de macroalgas marinas con los cambios propuestos en la sección de tratamiento de los gases es de 1 266 989,00USD.
2. El análisis económico muestra que se alcanzan en la inversión los siguientes indicadores, un VAN de \$862 607,82 con un TIR del 36 % y un periodo de recuperación de la inversión de 3,3 años, valores adecuados bajo las consideraciones efectuadas.
3. Para la capacidad de producción de la instalación propuesta se logra una remoción de 849 t/ año de CO<sub>2</sub>, lo que representa el CO<sub>2</sub> emitido por la quema de unas 166 t/año de combustible.

## Conclusiones

1. A partir del análisis de la revisión bibliográfica y de las particularidades y características de la instalación se determinó que el sistema de tratamiento de gases post-combustión es el adecuado para el proceso.
2. Para el tratamiento de los gases de combustión se determinó, mediante la simulación, que de las dos alternativas evaluadas, la utilización de una única columna es la adecuada para el proceso pues las concentraciones de  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$  a la salida se encuentran en el rango de asimilación de la *Ulva Lactuca*.
3. Para la planta de cultivo intensivo de Macroalgas Marinas se propuso un sistema de tratamiento que incluye una columna de burbujeo de 0,6m de diámetro, 4,2m de altura y un tiempo de residencia del líquido de 5 minutos, como equipo fundamental para la remoción del material particulado presente en los gases de combustión.
4. Mediante el análisis económico se determinó que es factible la implementación de la tecnología propuesta con un costo de inversión de 1 266 989,00USD, un VAN de \$862 607,82 con un TIR del 36 % y un periodo de recuperación de la inversión de 3,3 años.
5. El efecto ambiental de la Biorremediación Atmosférica es favorable por la mitigación de la contaminación generada por 849 t/ año de  $\text{CO}_2$  proveniente de los gases de combustión industriales de la ETE, a partir de la instalación de cultivo intensivo de Macroalgas Marinas propuesta.



## **Recomendaciones**

1. Realizar estudios experimentales que permitan aumentar la relación de asimilación de los gases de combustión por las macroalgas marinas.
2. Corroborar los resultados obtenidos de la asimilación de los gases mediante la simulación de forma experimental.
3. Aplicar este tipo de instalación como sistema de tratamiento de gases de combustión en otros procesos industriales que emitan gases de combustión al Medio Ambiente.

## Referencias Bibliográficas

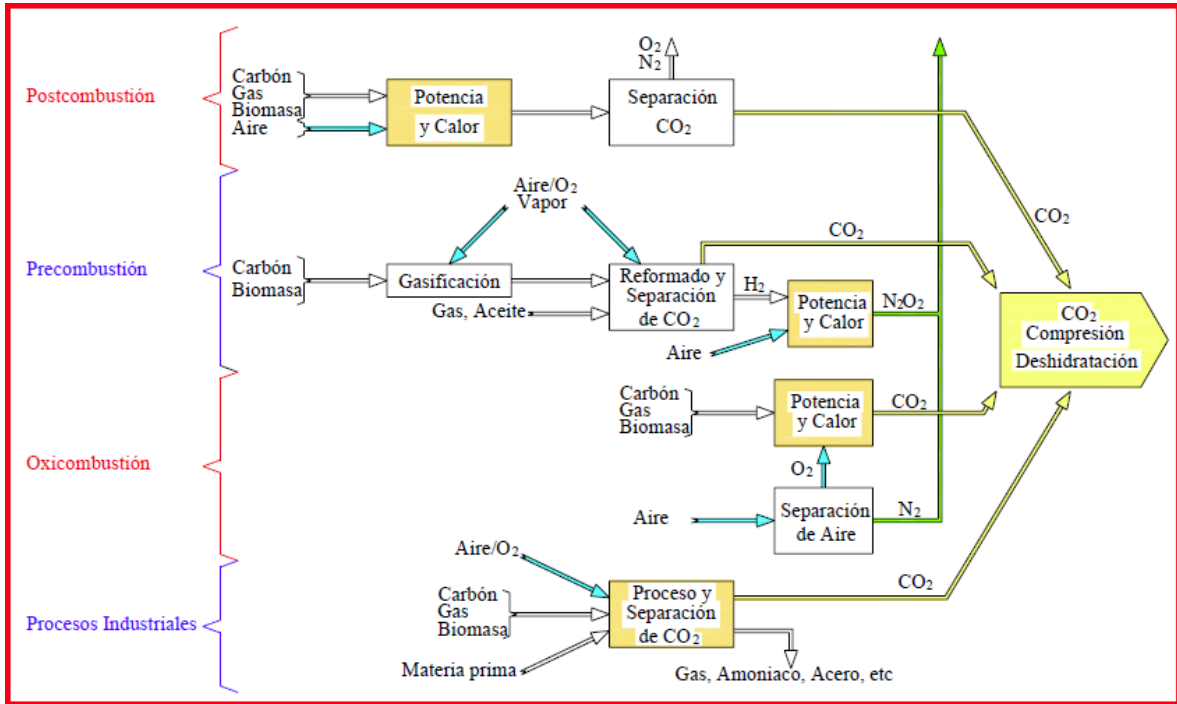
- ANGEL, M. 2012. *IMPACTO AMBIENTAL DE LA PLANTA TERMOELÉCTRICA DE CARBÓN* [Online]. quimicaiii608.blogspot.com.
- ARIAS, E. 2017. *Estudio prospectivo de instalaciones industriales para cultivo intensivo de macroalgas marinas en Cuba*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
- ARMANDO, P.-S., ALBERTO, C.-O. M., GISELA, M.-A., CONRADO, G.-G., RAMÓN, A.-B. & ENRIQUE, C.-R. H. 2013. Aspen Simulation of Diesel-Biodiesel Blends Combustion. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 16.
- ÁVILA, M. C., M.;ALCAPÁN, A. 2011. Manual de cultivo de algas comestibles.
- BASAURE, P. 2011. Alga Ulva Lactuca/Composta y biogás.
- BOWLES, D. 2007. "Micro-and macro-algae: utility for industrial applications." Outputs from the EPOBIO project.
- CANO MALLO, M. 2008. *Bases biológicas de ulva fasciata delile, (chlorophyta) para su posible explotación, al oeste de La Habana, Cuba*. . Universidad de la Habana.
- CAÑEDO, B. 2015. Crecimiento de ulva sp. En respuesta al enriquecimiento con nutrientes en condiciones de laboratorio.
- CASAI, E. 2016. Desarrollo de cultivos de Ulva sp como biofiltro en sistemas de AMTI.
- COBELAS, M. G., T. 1989. Una revisión sobre la biotecnología de las algas.
- ELISA, P. 2000. Tomo 1;Análisis del desarrollo de los cultivos:medio,agua y especies.
- EPA 2002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. *In: EPA (ed.). EPA 452/B-02-001. (2002).*
- ESPINOSA, I. A. 2016. Cursos de HYSYS.
- EURACTIV 2009. Algae the ultimate biofuel.
- FERNÁNDEZ, I. P. 2008. Captura y almacenamiento de CO2 procedente de instalaciones de combustión de energía eléctrica.
- FOLLANO, F. 2014. *OBTENCION DE MICROALGAS, Y PRODUCCION DE BIODIESEL MEDIANTE SIMULACIÓN, COMO ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DEL CO2 DE LA ATMOSFERA*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA.
- GARCÍA, P. 2008. Cultivo ecosostenible de algas marinas.
- GÓMEZ, E. 2013. Evaluación nutricional y propiedades biológicas de algas marinas comestibles. Estudios in vitro in vivo.
- GOMEZ, M. P. 2005. Pollution by nitrogen oxides: and approach to NOx abatement by using sorbing catalytic materials. Environment.
- GONZÁLEZ SEVERINO, G. 2014. *“Diversidad y abundancia de macroalgas en las zonas intermareales rocosas de las comunas montañita, la entrada y la rinconada, provincia de santa elena”*. Universidad Estatal Península de Santa Elena.

- KHELLAF, S. 2016. *Modelado y simulación de una planta de cogeneración mediante el simulador de procesos HYSYS*. Universidad de Sevilla.
- LAURENS, M. 2017. State of Technology Review – Algae Bioenergy.
- LEÓN, M. S. 2017. *Propuesta tecnológica para el acondicionamiento del agua de mar y los gases de combustión, utilizados en el cultivo intensivo de la macroalga “Ulva Lactuca sp”*. UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
- MATA, E. 2014. Formación y control de los óxidos de azufre.
- MELOSEVICH, I. W. & LLAXACONDOR, A. W. S. 2013. *SIMULACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODESEL EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO.
- MORALES, H. & TORRES, C. 2008. Tecnologías de captura y secuestro de CO<sub>2</sub>.
- NIKOLAISEN, L., DAUGBJERG JENSEN, P., SVANE BECH, K., DAHL, J., BUSK, J., BRØDSGAARD, T. 2011. Energy Production from Marine Biomass (Ulva lactuca).
- NIKOLAISEN, L. T. M., L.;BRUHN, A 2012. Danish State-of-Art on Micro and Macro Algae
- OILGAE 2006. Aquatic plant growth response to very high CO<sub>2</sub> concentration.
- PETERS, M. T., KLAUS 1991. *Plant design and economics for chemical engineers*, Editorial Advisory Board.
- PFÄFFLIN, R. Z., N 2010. Encyclopedia of environmental science and engineering.
- PLAZA 2010a. Búsqueda de nuevos ingredientes funcionales naturales procedentes de algas.
- PLAZA, M. 2010b. Búsqueda de nuevos ingredientes funcionales naturales procedentes de algas.
- RÍOS GARCÍA, J. 2016. *“Propuesta de diseño preliminar de una planta industrial de cultivo intensivo de macroalga (Ulva Lactuca) a partir del CO<sub>2</sub> residual de la Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes”*. Universidad Marta Abreu de las Villas.
- RIOS, J. 2016. *Propuesta de diseño preliminar de una planta industrial de cultivo intensivo de macroalga (Ulva Lactuca) a partir del CO<sub>2</sub> residual de la Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- ROBLEDO RAMIREZ, D. 1993. *Cultivo, adaptación morfológica y fisiopatología de macroalgas marinas de interés industrial*. Universidad de Las Palmas Gran Canaria.
- ROBLEDO RAMÍREZ, D. 1993. *Cultivo, adaptación morfológica y fisiopatología de macroalgas marinas de interés industrial*. Universidad de Las Palmas Gran Canaria.
- ROCHE, L. 2015. ....

- RODRIGUEZ, A. G., TOUSET, J. P. H., AVILÉS, Y. & GONZÁLEZ, A. M. 2012. Evaluación de sistema experimental para el cultivo intensivo de macroalgas marinas. *Cento Azúcar*.
- SMA 2006. Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas.
- SOLÍS BRAVO, I. 2007. *Estudio comparativo de las propiedades finales de extractos de carragenina  $\kappa$ -I /  $\kappa$ -II utilizando distintas algas productoras de carragenina  $\kappa$ -II*. Universidad Austral de Chile.
- VELÁSQUEZ, M. 2012. Una alternativa sostenible y de futuro para los cultivos marinos.

Anexos

Anexo A- Sistemas de capturas de CO<sub>2</sub>.

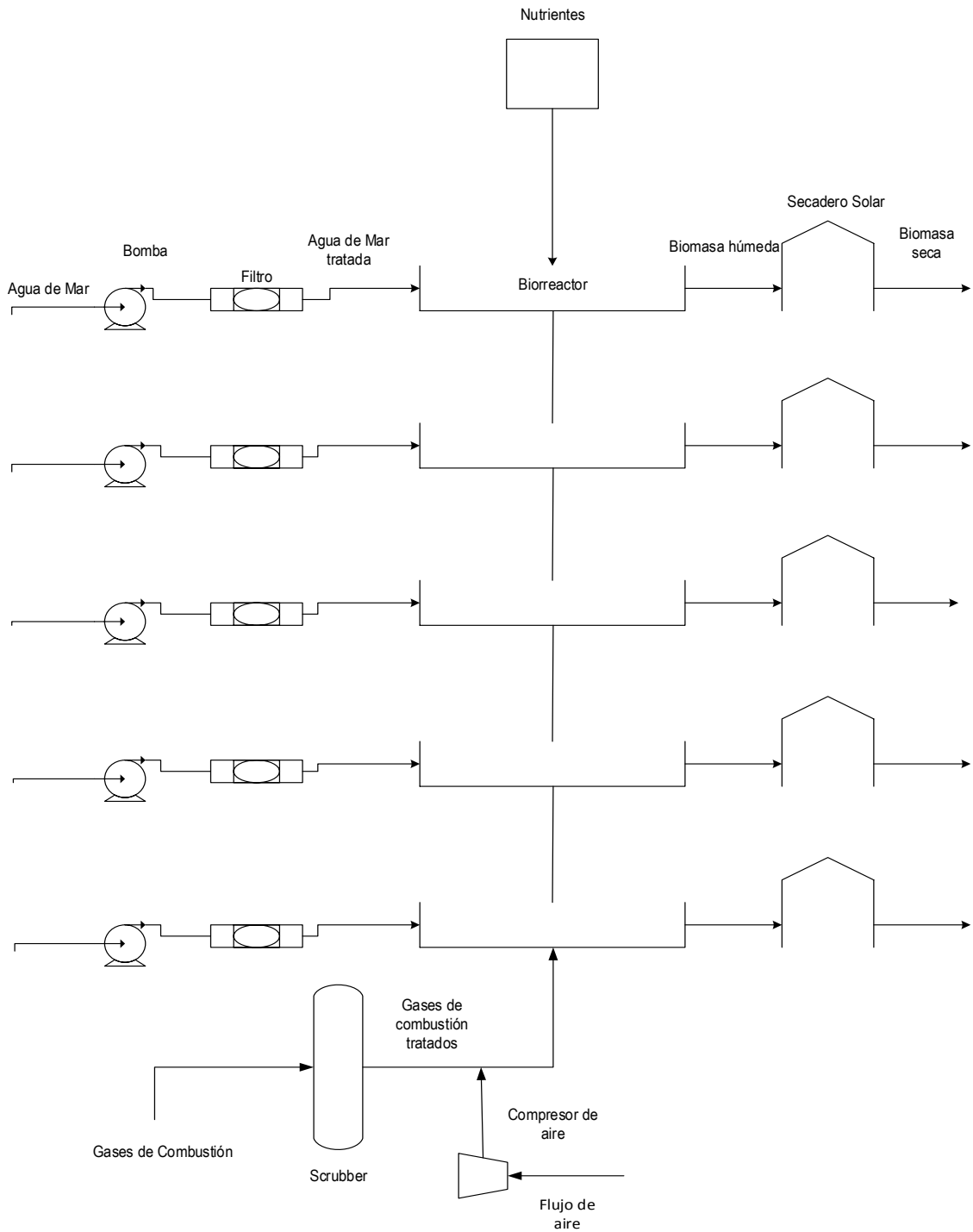


**Anexo B-** Datos de las corrientes de la simulación.

Material Streams		Compositions	Energy Streams	Unit Ops				
Name	Vapour Fraction	Temperature	Pressure	Molar Flow	Mass Flow	Liquid Volume Flo	Heat Flow	
Aire	1.000	537.8	101.3	2.080e+004	6.000e+005	693.6	3.273e+008	
L	0.0000	400.0	101.3	270.5	3249	1.979	1.449e+006	
GC1	1.000	400.0	101.3	2.102e+004	6.332e+005	759.8	-8.077e+008	
GC2	0.9873	400.0	101.3	2.129e+004	6.365e+005	761.8	-8.062e+008	
GC3	0.9873	397.9	101.3	2.129e+004	6.365e+005	761.8	-8.077e+008	
Agua	0.0000	27.00	1.250e+004	30.20	544.0	0.5451	-8.632e+006	
Vapor	1.000	328.0	1.250e+004	30.20	544.0	0.5451	-7.163e+006	
Gases despedidos	0.9873	397.9	101.3	1.809e+004	5.410e+005	647.5	-6.865e+008	
Gases para el trata	0.9873	397.9	101.3	3193	9.547e+004	114.3	-1.212e+008	
H2O	0.0000	25.00	101.3	2000	3.603e+004	36.10	-5.724e+008	
GT1	1.000	46.91	101.3	3470	1.007e+005	119.7	-2.333e+008	
Desechos	0.0000	46.91	101.3	1723	3.081e+004	30.68	-4.788e+008	
GT-F	1.000	31.76	101.3	3302	9.611e+004	116.9	-1.799e+008	
Residuo	0.0000	31.76	101.3	289.4	6602	5.608	-7.895e+007	
Solvente1	0.0000	25.00	101.3	95.00	2025	1.777	-2.562e+007	
GPT	0.9873	220.0	101.3	3193	9.547e+004	114.3	-1.396e+008	
Solvente 2	0.0000	25.00	101.3	96.00	2152	1.817	-2.533e+007	
Solvente 3	0.0000	25.00	101.3	96.00	1940	1.775	-2.644e+007	
Combustible-2	0.1100	50.00	101.3	3182	3.745e+004	31.87	3.624e+007	
Combustible	0.1200	50.00	101.3	3182	3.650e+004	32.30	2.742e+007	
Combustible-3	0.1100	50.00	101.3	3182	3.809e+004	32.13	4.507e+007	

## Anexo C selección del compresor.

Detalles del producto		Perfil de la empresa	transacciones Visión		
Modelo	Desplazamiento	Presión de escape	De alimentación reted	Peso	Tamaño
	M3/min	MPa	KW	KG	Mm x mm
LGCY-6/7	6	0.7	YCD4B22-95, 70kW	1400	3750 × 1920 × 1700
LGCY-7.5/7	7.5	0.7	YC4D80-K20, 58kW	1850	3900 × 1920 × 1700
LGCY-9/7	9	0.7	YC4D95Z-K20, 70kW	1850	3900 × 1920 × 1700
LGCY-10/7	10	0.7	YC4D95Z-K20, 70kW	1900	3900 × 1920 × 1700
LGCY-10/10	10	1	4BTA3. 9-C125, 93kW	1900	3900 × 1920 × 1900
LGCY-10/13	10	1.3	YC6B150Z-K20, 110KW	2380	4080 × 1980 × 2350
LGCY-8.5/14	8.5	1.4	4BTA3. 9-C125, 93kW	1900	3900 × 1920 × 1900
LGCY-12/7	12	0.7	4BTA3. 9-C125, 93kW	2050	3900 × 1920 × 1900
LGCY-12/7A	12	0.7	YC4A125Z-T10, 92kW	2050	4000 × 1980 × 1900
LGCY-9/14	9	1.4	YC6B150Z-K20, 110KW	2380	4080 × 1980 × 2350
LGCY-9/14.5	9	1.45	YC6B150Z-K20, 110kW	2380	3970 × 1940 × 2350

**Anexo D-** Diagrama de flujo del proceso de cultivo intensivo de *Ulva Lactuca*



**Anexo E-Datos técnicos para selección de la bomba**

Serie **STH 32** (2.900 rpm)

tamaño bridas Imp: **DN32** - Asp: **DN50**

Tipos	Motor P2		Caudal en m³/hora													
	CV	Kw	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	36			
			Altura en metros													
• STH 32-125B	1,5	1,1	21,5	21	20	19	17,2	15	10							
• STH 32-125A	2	1,5	26,5	25,5	25	23	20	16	11							
• STH 32-160C	2	1,5		26	25,5	24,5	23	21,5	19	15,5						
STH 32-160B	3	2,2			32	31,5	30	28	25	22						
STH 32-160A	4	3				38,5	37	35	32,5	29,5						
STH 32-200C	5,5	4		43,5	43	42,5	42	40	38	36	33	28				
STH 32-200B	7,5	5,5		53	52,5	52	50,5	48,5	47	45	44	42	32			
STH 32-200A	10	7,5		60,5	60	59	58	57	56	54	51,5	50	43			
STH 32-250C	12,5	9,2			70	69	68	66	63,5	60						
STH 32-250B	15	11			88	87,5	87	86	84	78	67					
STH 32-250A	20	15			96,5	96	95,5	95	92,5	87	75					

• Estos tipos se suministran también con motor monofásico 230 V.

**Anexo F -Equipo para limpieza de gases de combustión**



**Anexo G – Ejemplo de planta piloto para cultivo intensivo de macroalgas**

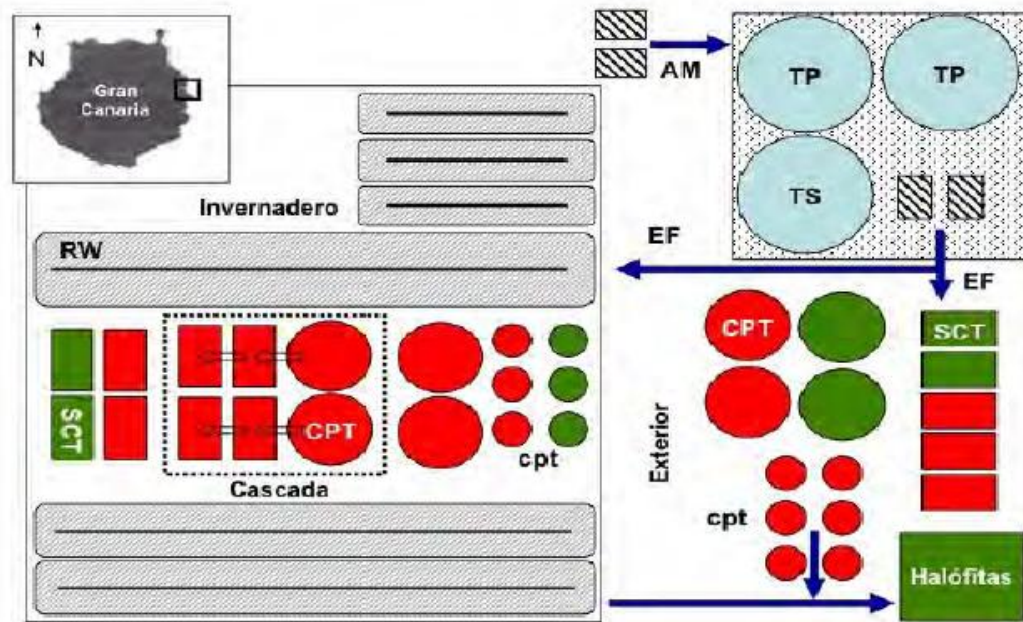


Figura 2. Diagrama de la planta piloto para el cultivo de algas del Centro de Biotecnología Marina (CBM-ULPGC), asociada a los tanques para el cultivo de peces desde donde se realiza el trasvase de los efluentes ricos en nutrientes. AM: agua de mar; TP: tanques peces; TS: tanque de sedimentación; EF: flujo de los efluentes; SCT: tanques semi-circulares de fibra de vidrio (750 L, 1,8 m<sup>2</sup>); CPT: tanques de polietileno (1.500 L, 1,5 m<sup>2</sup>); cpt: tanques de polietileno (90 L, 0,2 m<sup>2</sup>); RW: estanques tipo "raceway".

## Anexo H—Ejemplos de instalaciones con tanques tipo abierto para cultivo intensivo de macroalgas

