



**REPÚBLICA DE CUBA**  
**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR**  
**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS**  
**“Carlos Rafael Rodríguez”**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

**TESIS DE DIPLOMA**

**Título:**

**Acondicionamiento de los gases de combustión de la Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” para su empleo en el cultivo intensivo de macroalgas marinas.**

**Autor:**

**Marcos Ulises Socarrás León**

**Tutores:**

**Dr.C. Agustín García Rodríguez**  
**Ing. Liset Roche Delgado**  
**Ing. Eliané Arias Molina**

**Consultantes: Ing. Rafael Sosa Beltrán**

**Realizado en Cienfuegos, República de Cuba.**  
**Curso 2019 - 2020.**

## **Pensamiento**

*El talento no lo es todo. Lo puedes tener desde la cuna, pero es necesario aprender el oficio para ser el mejor.*

*Cristiano Ronaldo*

## Dedicatoria

*A mis padres por ser las personas más querida e importante en mi vida, por su constante preocupación y apoyo incondicional, por ser los mejores de este mundo.*

## **Agradecimientos**

*A mis padres por su dedicación, apoyo, empeño y confianza brindada durante todo el período de mi formación.*

*A mi familia por su apoyo día a día por lograr mi sueño.*

*A mis tutores en especial a Eliané Arias Molina y Liset Roche Delgado que las que desde un principio me dieron la confianza de que este proyecto se iba a realizar exitosamente, gracias y mil gracias por su trabajo constante en dicho proyecto por el cual les estaré agradecido toda la vida.*

*A mis compañeros de aula en especial a Víctor Manuel Serrano y Malena Navarro, que fueron un factor primordial por su amistad, apoyo y momentos especiales a sus lados que me hacen muy orgulloso de haber sido parte de ese colectivo.*

*A mi novia Diana Laura Martín por estar siempre a mi lado y apoyarme en todo momento.*

*A mis profesores por sus conocimientos aportados que sin duda son los principales artífices de mi formación como ingeniero.*

## Resumen

En Cuba no existen instalaciones de tratamiento de gases para disminuir el  $\text{SO}_2$  residual proveniente de gases de combustión, siendo esta una variante atractiva para disminuir las emisiones de estos gases al medio ambiente. El presente trabajo se realizó con el objetivo de proponer un diseño de una torre de absorción a escala de laboratorio, con el objetivo de acondicionar los gases de combustión de la Termoeléctrica "Carlos Manuel de Céspedes" para su empleo en el cultivo intensivo de macroalgas marinas. Se diseñó una columna de absorción para absorber el  $\text{SO}_2$  lo cual a su vez necesitó del diseño de un sistema de tuberías y la selección de una bomba para llevar el agua de mar desde los enfriadores hasta la columna. Para la sección de acondicionamiento de gases se diseñó una torre rellena de absorción con anillos Rasching de cerámica de 1 pulg, el cual fue seleccionado por las ventajas del mismo. Para el cálculo de dicha columna se realizó un balance de materia para obtener las concentraciones y flujos de salida del gas, se calculó el caudal mínimo de solvente necesario para el buen funcionamiento de la torre. Efectuado los cálculos se llegó a que dicha torre debe tener una altura de 0,694 m y un diámetro de 0,0268 m para la absorción del  $\text{SO}_2$  con un flujo de gases de 0,014 kg/s. Se estima de forma preliminar que para materializar el experimento se deben invertir \$ 2151,93 obteniendo un costo de producción de 1795,88 \$/año.

## Summary

In Cuba there are no gas treatment facilities to reduce residual SO<sub>2</sub> from flue gases, this being an attractive variant to reduce emissions of these gases into the environment. The present work was carried out with the aim of proposing a design for a laboratory-scale absorption tower, with the aim of conditioning the combustion gases of the Carlos Manuel de Céspedes Thermoelectric Plant for use in the intensive cultivation of marine macroalgae. An absorption column was designed to absorb SO<sub>2</sub>, which in turn required the design of a piping system and the selection of a pump to carry the seawater from the coolers to the column. For the gas conditioning section, an absorption filled tower is designed with 1-inch ceramic Rasching rings, which was selected for its advantages. For the calculation of said column, a material balance was performed to obtain the gas outlet concentrations and flows, the minimum solvent flow necessary for the proper operation of the tower was calculated. Once the calculations were made, it was arrived at that said tower must have a height of 0.694 m and a diameter of 0.0268 m for SO<sub>2</sub> absorption with a gas flow of 0.014 kg / s. It is preliminary estimated that \$ 2151,93 must be invested to materialize the experiment, obtaining a production cost of \$ 1795,88 / year.

## Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Marco Teórico. ....	2
Introducción al capítulo.....	2
1.1 Generalidades de los gases de combustión. ....	2
1.2 Efectos ambientales de los gases de combustión.....	6
1.3 Tratamientos de gases de combustión .....	8
1.4 Principales tecnologías de desulfuración de gases. ....	9
1.5 Estrategias para el control de las emisiones de SO <sub>2</sub> en las centrales termoeléctricas. ....	13
1.6 Absorción de gases .....	14
1.7 Equipamiento utilizado en procesos de absorción.....	15
1.8 Parámetros de diseño de una columna de absorción.....	21
1.9 Macroalgas marinas. ....	23
1.10 Parámetros que influyen en el cultivo intensivo de macroalgas. ....	23
1.11 Empleo de gases de combustión en el cultivo de macroalgas. ....	28
Conclusiones parciales .....	30
Capítulo 2: Diseño de una columna de absorción del SO <sub>2</sub> de los gases combustión. ....	31
2.1 Proceso de cultivo de macroalga Ulva Lactuca. ....	31
2.2 Descripción del proceso a desarrollar .....	32
2.3 Elección del tipo de torre a utilizar. ....	33
2.4 Selección del solvente.....	34
2.5 Balance de materiales del proceso de absorción.....	35
2.6 Cálculo del diámetro de la columna .....	37
2.7 Altura de la columna.....	39
2.8 Cálculo de la pérdida de presión.....	41
2.9 Resumen del diseño de la torre .....	43

2.10 Selección del equipo de bombeo .....	43
Capítulo 3: Análisis económico de la instalación propuesta. ....	46
3.1 Costo de adquisición del equipamiento .....	46
3.2 Costo total de inversión (CTI) .....	46
3.3 Costo total de acondicionamiento de los gases de combustión. ....	47
Conclusiones.....	50
Recomendaciones .....	51
Bibliografía.....	52
Anexos.....	57

## **Introducción**

En los últimos años la preocupación por el medio ambiente ha ido creciendo rápidamente. Cada día existe una mayor cantidad de personas y empresas que se interesan más por el bienestar del medio ambiente, y toman medidas y acciones para su cuidado, como el reciclaje y la reutilización de desechos.

Unos de los procesos contaminantes más comunes que ocurren día a día en nuestro país y en el mundo es la combustión de combustibles fósiles. Este proceso ocurre a diferentes escalas, tanto a nivel industrial como doméstico, y está presente en calderas, hornos, termoeléctricas, automóviles, y otros. Producto de esta combustión se generan dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) y material particulado. Estos contaminantes contribuyen a problemas ambientales como el calentamiento global (efecto invernadero) y la lluvia ácida, además de ser perjudiciales para la salud de las personas.

La solución definitiva a este problema es encontrar una fuente de energía capaz de reemplazar a los combustibles fósiles, idealmente, con una fuente de energía limpia y más eficiente. Estas inquietudes han logrado desarrollar tecnologías que utilizan efectivamente la energía solar y eólica (entre otras), pero estas fuentes no son capaces de cumplir con la demanda actual que tienen los combustibles fósiles (Castañeda, 2005).

Para poder regular la contaminación producida por los combustibles fósiles actualmente existen normativas, tanto nacionales como internacionales, que limitan las emisiones de estos contaminantes a la atmósfera. Para cumplir con estas normativas se han desarrollado diferentes tecnologías, y las diversas empresas que utilizan combustibles fósiles en sus procesos han tenido que implementarlas. A lo largo del tiempo, estas normativas se van volviendo cada vez más exigentes, por lo que estas y nuevas tecnologías están en constante investigación y desarrollo (Arturo Rodas, 2015).

En el presente trabajo se revisan las tecnologías más utilizadas en la industria para controlar las emisiones de material particulado y dióxido de azufre. También, se ve en que consiste un sistema de desulfuración de gases de combustión, utilizados en termoeléctricas. Por todo esto llevaremos a cabo el estudio de las principales torres de absorciones y su diseño.

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

### **Problema Científico**

Es necesario profundizar en el estudio del acondicionamiento de los gases de combustión para el desarrollo de la instalación del cultivo intensivo de macroalgas marinas, con el fin de aprovechar el CO<sub>2</sub> residual industrial y consecuentemente mitigar la contaminación atmosférica.

### **Hipótesis**

Es posible, acondicionar los gases de combustión de la TEM Carlos Manuel de Céspedes, para obtener un adecuado sistema de cultivo intensivo de la macroalga *Ulva Lactuca* técnica económica y ambiental compatible, según los requerimientos de la tecnología propuesta sobre la base de la calidad del suministro de nutrientes, y los parámetros de diseño y operación del biorreactor.

### **Objetivo General**

Proponer una tecnología viable para el acondicionamiento de los gases de combustión de la TEM CMC para utilizarlo en el cultivo intensivo de *U. Lactuca*, según los intereses de la investigación que se desarrolla en este tema y los recursos disponibles.

### **Objetivos Específicos**

1. Realizar análisis bibliográfico sobre tecnología de tratamiento de gases de combustión, su aplicación al cultivo intensivo de macroalgas marinas y en especial de *U. Lactuca*.
2. Seleccionar el solvente más adecuado para el acondicionamiento de los gases de combustión.
3. Diseñar una Columna Gas- Líquido para el tratamiento de gases de combustión en operación continua para el cultivo intensivo de macroalgas marinas.
4. Realizar el análisis técnico- económico y ambiental de la instalación propuesta.

## Capítulo 1: Marco Teórico.

### Introducción al capítulo.

Los gases de escape generados por los diferentes procesos industriales 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.

#### 1.1 Generalidades de los gases de combustión.

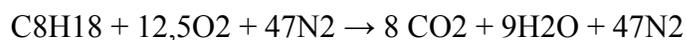
La combustión es la combinación rápida del O<sub>2</sub> con los elementos inflamables del combustible. En la mayoría de los combustibles fósiles hay tres elementos combustibles significativos, C, H<sub>2</sub> y S; el S es el de menor importancia como fuente de calor, pero puede tener una influencia importante en problemas de corrosión y contaminación. Podemos clasificar los gases de combustión básicamente en dos tipos: Gases inofensivos y Gases contaminantes.

**Inofensivos:** están involucrados el nitrógeno, el oxígeno, el dióxido de carbono, el vapor de agua y el hidrógeno.

**Contaminantes:** lo más destacados son los correspondientes al monóxido de carbono, los hidrocarburos no quemados dentro de la combustión y bajo algunas condiciones los óxidos de nitrógeno(GOMEZ, 2005).

#### Reacciones químicas de combustión

Todos los gases de combustión se obtienen a partir de la reacción química del aire y del combustible que ingresa al motor, el aire tiene un 80 % de Nitrógeno y un 20 % de Oxígeno (aproximadamente). Se puede señalar que, la ecuación original es la siguiente:



## **Productos de la combustión**

### **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.(Mesa 2018)

### **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).

### **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.

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

### **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.

**Óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>, fórmula total Nox):**

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 (NO<sub>2</sub>). Ambos óxidos son tóxicos; el NO<sub>2</sub> 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 NOx. 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 (SO<sub>2</sub>):**

El óxido de azufre, también llamado dióxido de azufre, gas sulfuroso y 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 (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 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 (H<sub>2</sub>S):**

El sulfuro de hidrógeno es un gas tóxico que huele mal incluso en concentraciones mínimas (aprox. 2,5 µm/m<sup>3</sup>). 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 H<sub>2</sub>S de los gases de combustión, incluida la combustión

para formar SO<sub>2</sub>, determinados procesos de absorción o, para niveles más importantes, la conversión en azufre elemental en una instalación Claus(EPA, 2002).

### **Hidrocarburos (HC o C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>):**

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 (CH<sub>4</sub>), butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) y benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), 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 C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> total. Esta suma se determina generalmente en los gases de combustión.

### **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°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).

### **Plomo**

Es el metal más peligroso contenido en los aditivos de combustible. Inhalado puede provocar de coágulos o trombos en la sangre.

### **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. El efecto nocivo del polvo sobre las personas está producido particularmente por la deposición de sustancias tóxicas y cancerígenas en las partículas de polvo(GOMEZ, 2005).

### **1.2 Efectos ambientales de los gases de combustión.**

El gran consumo de energía propio de la sociedad industrializada es la principal causa de la contaminación atmosférica. Por lo tanto, la contaminación atmosférica y su impacto dependerán de:

1. Las tendencias mundiales de abastecimiento de energía.
2. Las medidas mundiales tomadas para proteger la atmósfera.

Además, se espera que los niveles de emisión de  $SO_2$  se incrementen alrededor de un 38% en el 2030 (Pretorius, 2015).

La presencia de azufre en el combustible usado en hornos y calderas, hace que se produzcan emisiones de óxidos de azufre. En el caso de los combustibles fósiles, el azufre que contienen está en forma de sulfuros inorgánicos o de compuestos orgánicos. En el carbón, más concretamente, el azufre está presente en forma de azufre pirítico y de azufre orgánico, así como de sales de azufre y de azufre elemental.

En la atmósfera, el dióxido de azufre es convertido parcialmente en trióxido de azufre debido a procesos oxidativos y fotoquímicos. Cuando se unen trióxido de azufre y vapor de agua se produce ácido sulfúrico, aquí surge la problemática de las lluvias ácidas en la superficie de la tierra y en las masas de agua, debido a los aerosoles ácidos que puedan

depositarse en forma de precipitaciones(Garcés Giraldo, 2004). Aunque las lluvias ácidas no sólo se deban a este ácido, se dice que este es la principal fuente.

#### **Efectos de la lluvia ácida:**

1. Acidificación de fuentes naturales de agua.
2. Desmineralización del suelo.
3. Lixiviación de los nutrientes de la tierra.
4. Aumento de la corrosión de los materiales.
5. Reducción de la visibilidad atmosférica(Garcés Giraldo, 2004).

#### **Efectos sobre la salud**

El SO<sub>2</sub> puede producir bronco-constricciones a varias especies de animales, incluyendo al hombre, cuando se encuentra en concentraciones mayores o iguales a 5 ppm.

Según la OMS, se recomienda que no se supere una concentración de SO<sub>2</sub> de 500 µg/m<sup>3</sup> durante periodos con una duración media de 10 minutos. Como la exposición breve al SO<sub>2</sub> depende en gran medida de la naturaleza de las fuentes locales y de las condiciones meteorológicas, no es posible aplicar un factor sencillo para estimar los valores durante periodos de tiempo más prolongados, como por ejemplo una hora(OMS., 2005).

#### **Efectos en la visibilidad**

Las partículas en suspensión en la atmósfera reducen el rango visual al dispersar y absorber la luz. La neblina atmosférica que aparece se debe a la formación de aerosoles resultantes de las reacciones fotoquímicas entre el SO<sub>2</sub>, las partículas, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos presentes en la atmósfera. Aquí se producen unas gotitas de niebla de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) debido a una serie de reacciones fotoquímicas, y estas dispersan la luz. Los aerosoles de ácido sulfúrico y otros sulfatos constituyen del 5 al 20% de las partículas en suspensión en el aire urbano, por lo que contribuyen significativamente a la reducción de la visibilidad.

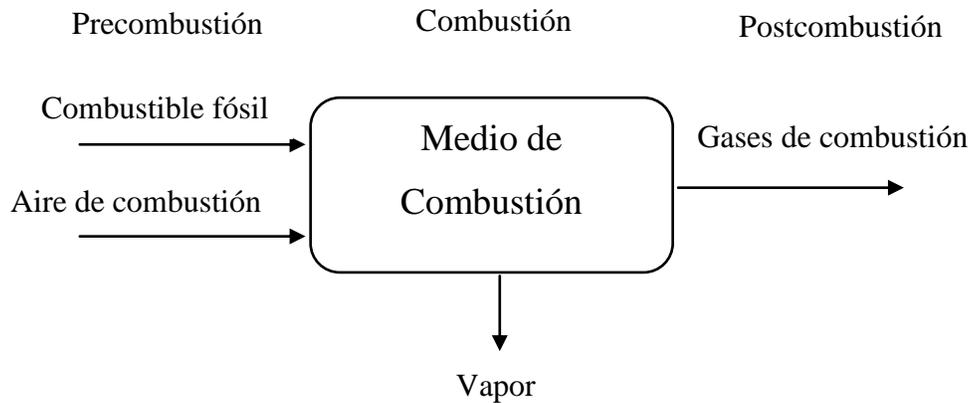
#### **Efectos sobre los materiales**

Los compuestos de azufre ocasionan un gran daño a diferentes tipos de materiales. Los óxidos de azufre normalmente aceleran la corrosión de metales al formar ácido sulfúrico, ya sea en la atmósfera o en la superficie del metal. Este efecto corrosivo se ve potenciado por la presencia de este ácido en la composición de las lluvias ácidas. Se pueden observar sus

efectos fácilmente en los materiales de construcción de los edificios, así como en el medio natural, por ejemplo, en los bosques(Curiel Alegre, 2017).

### 1.3 Tratamientos de gases de combustión

El objetivo del proceso de tratamiento de gases 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 (Figura 1.1), se analizan cada una de las etapas de este proceso.



**Fig. 1.1: Esquema de combustión de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica. Fuente: Elaboración propia.**

**Precombustión:** se refieren al tratamiento químico del combustible antes de ser inyectado a la caldera u horno, siendo la más popular la denominada tecnología de hidrotratamiento (HDT) o hidro-desulfuración (HDS), que consiste en someter al combustible líquido con hidrógeno a cierta presión y temperatura (~150-160 psi y 300-400 °C), en presencia de un catalizador sólido bimetálico basado en un sulfuro de níquel-molibdeno, cobalto-molibdeno o volframio-molibdeno, de manera que los compuestos orgánicos sulfurados contenidos en dicho combustible son transformados a sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), que es eliminado del proceso para su posterior purificación y comercialización.

La desventaja de la tecnología HDS es el límite de eliminación de azufre del combustible, siendo este umbral de alrededor del 95%, aunado a los altos consumos de hidrógeno

durante el proceso. Algunas marcas comerciales son Chevron, Unocal, Shell, Exxon Research, MobilOil, Kellogg ABB Lummus, entre otras.

**Combustión:** están basadas en la inyección de compuestos químicos absorbentes en el interior de la flama y participan en el proceso de combustión. Dichos compuestos están constituidos principalmente por soluciones acuosas alcalinas de cal-caliza, de manera que el dióxido de azufre formado en la zona de oxidación de la flama se neutraliza y es absorbido por esta solución con la subsiguiente formación de sulfatos.

La desventaja principal de estas tecnologías es la disminución de la temperatura de la flama, ocasionando un incremento de partículas no quemadas en los gases de combustión, además de la formación de depósitos de sulfato de calcio (sarro) en las tuberías de transporte de los gases de combustión.

**Postcombustión:** conocidas también como tecnologías de desulfuración de gases de combustión o FGD (Flue Gas Desulfurization), constituyen el grupo más numeroso de las dos anteriores, en donde además se incluyen algunos nombres de las tecnologías comerciales más conocidas o actuales (Arturo Rodas, 2015).

#### **1.4 Principales tecnologías de desulfuración de gases.**

La desulfuración es el proceso de eliminación del azufre de diferentes productos industriales para evitar la contaminación o para cumplir con los estándares de calidad de dichos productos. También conocido como hidrodesulfuración o HDS, este proceso químico reduce las emisiones de dióxido de azufre y los convierte en ácido sulfúrico. En la desulfuración con absorbentes se pasan los gases a contracorriente con una solución finamente dividida del absorbente (Picó, 2012). La selección del depurador de gas dependerá de las características del proceso operativo y el contaminante o contaminantes que están siendo eliminados.

Los procesos de desulfuración de gases se dividen en dos clases: con regeneración y sin regeneración como se muestra en la Tabla 1.1, siendo ambos procesos de depuración húmedos. Como el  $\text{SO}_2$  es un gas ácido, casi todos los procesos de depuración utilizan una solución acuosa o una lechada de un material alcalino (Velasco Hurtado, 2005).

**Tabla 1.1 Procesos de desulfuración**

Procesos de depuración húmedos					
Procesos de depuración con regeneración					
Origen del proceso	Operación del proceso	Material reactivo	Temperatura	Producto principal de azufre	Aplicaciones comerciales
Citrato	Solución de citrato de sodio	H <sub>2</sub> S	35-60 °C	Azufre elemental	Numerosas
Wellman-Lord	Solución de Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> -NaHSO <sub>3</sub>	40-60 °C	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /SO <sub>2</sub> azufre elemental	Numerosas
Carbonato de sodio (doble álcali)	Solución de Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> regeneración con CaO/CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> o CaO/CaOH	46-56 °C	CaSO <sub>3</sub> o CaSO <sub>4</sub>	Algunas
Óxido de magnesio	Lechada de Mg(OH) <sub>2</sub>	MgO	50 °C	MgSO <sub>3</sub> /MgSO <sub>4</sub> SO <sub>2</sub> CONC.	Algunas
Proceso de depuración sin regeneración					
Cal	Depuración con lechada	CaO/CaOH	46-55 °C	CaSO <sub>3</sub> o CaSO <sub>4</sub>	Industria de construcción
Piedra caliza	Depuración con lechada	CaCO <sub>3</sub>	46-55 °C	CaSO <sub>3</sub> o CaSO <sub>4</sub>	Industria de construcción
Agua de mar	Agua de mar-Cal/piedra caliz	Mg(OH) <sub>2</sub>	5-11 °C	MgSO <sub>4</sub> Yeso Mg(OH) <sub>2</sub>	Algunas
Chiyoda	Depuración con lechada	H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> /SO <sub>2</sub> azufre elemental	55-70 °C	CaSO <sub>3</sub> o CaSO <sub>4</sub>	Industria de construcción

### Procesos regenerativos

En este tipo de procesos, el SO<sub>2</sub> tras su eliminación se transforma recuperándose como H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o SO<sub>2</sub>, y el absorbente se puede volver a utilizar después de un tratamiento químico o térmico.

Estos procesos regenerativos ya están suficientemente consolidados, pero su alta complejidad, sus elevados costes de inversión, y su mayor consumo de energía, han hecho que su uso no sea frecuente en las centrales térmicas de combustión.

Además, estos procesos tienen costes de operación y mantenimiento más altos en comparación con otros procesos no regenerativos, y la venta del subproducto generado no compensa el aumento de los costes.

### **Procesos no regenerativos**

En estos procesos, el  $\text{SO}_2$  es eliminado como un residuo sólido, y no suele tener ninguna otra utilidad, a excepción de los procesos en los que se produce yeso, que puede venderse como producto. En la actualidad, se está consiguiendo cada vez más recuperar el reactivo utilizado de una manera económica, para generar menos costes de operación (Castañeda, 2005).

**Desulfuración con cal o caliza:** se prepara una disolución de lechada de cal o la caliza generando unas cantidades elevadas de residuos sólidos que contienen sulfito y sulfato cálcico. Se consiguen eficacias de eliminación del 60 al 90 %, pero hay que tener en cuenta los problemas de formación de costras y corrosión de las torres.

**Desulfuración con óxido de magnesio:** es un procedimiento similar al de la lechada de cal, solo que con óxido de magnesio en vez de óxido de calcio. El sulfito o sulfato de magnesio se puede calcinar fácilmente. Produce muy pocos residuos, pero el proceso de regeneración requiere de energía.

**Desulfuración con solución de sosa:** se puede utilizar una disolución de hidróxido de sodio o carbonato sódico para absorber  $\text{SO}_2$ , obteniéndose sulfatos solubles, que se pueden recoger en balsas de evaporación. Habitualmente se utilizan concentraciones de 10 – 20 % en la solución alcalina, dependiendo de los niveles de concentración de  $\text{SO}_2$  u otros compuestos azufrados en el gas residual. Los flujos de dicha solución estarán en correspondencia con los volúmenes de gases que se van a tratar.

**Desulfuración con amoníaco:** los óxidos de azufre se absorben dando sulfato amónico. La utilización del amoníaco produce gran cantidad de vapores, pero su producto tiene mejor salida para su uso como fertilizante.

**Desulfuración con sulfito de sodio:** este método no plantea problema de incrustaciones pues los productos obtenidos son solubles. El reactivo debe ser muy puro por lo que se suele emplear en pequeñas calderas industriales. El  $\text{SO}_2$  concentrado se puede reducir a azufre u oxidar a ácido sulfúrico.

**Desulfuración con doble álcali:** en este caso se hace un primer tratamiento con sosa cáustica (NaOH) que conduce a la formación de sulfito de sodio. Posteriormente el producto se mezcla con lechada de cal para conseguir precipitar el sulfito de calcio y regenerar la sosa. Presenta altos rendimientos y poca formación de costras (Picó, 2012).

**Desulfuración con agua de mar:** Los gases de combustión entran en contacto con el agua de mar, que contiene bicarbonato y carbonatos. Se aprovechan sus propiedades inherentes para absorber y neutralizar los óxidos de azufre (Córdoba, 2015). El aire que se introduce promueve la oxidación del SO<sub>2</sub> absorbido, que va a pasar de bisulfito a bisulfato (Kohl, 1997).

Este proceso tiene las siguientes características (Curiel Alegre, 2017):

- Porcentaje de reducción: Entre el 85 y el 98%.
- Temperatura de funcionamiento: 145 °C (entrada del gas de combustión). 30 – 40 °C (agua de mar de salida).
- Absorbente utilizado: Agua de mar.
- Consumo energético: 0,8 – 1,6% de la capacidad eléctrica.
- Consumo de agua: Depende de la concentración de bicarbonato en el agua de mar y del caudal de gas tratado.
- Fiabilidad de la técnica utilizada: 98 – 99%.
- Caudal máximo de gas de combustión: Sin limitaciones.
- Residuo/subproducto: Ninguno, no se generan aguas residuales.
- Tiempo de residencia en el depurador: 15 minutos.
- Porcentaje de eliminación de otros compuestos: Del HCl entre un 95 y un 99%, y del HF entre un 95 y un 99%.

**Ventajas:**

1. La disponibilidad del absorbente es muy grande y con bajo coste económico.
2. No es necesario emplear reactivos como Ca(OH)<sub>2</sub> ó CaCO<sub>3</sub> ya que el agua de mar es alcalina
3. La planta de tratamiento del fluente líquido es mucho más sencilla, tan solo consiste en una balsa de oxidación y otra de neutralización
4. No se generan residuos sólidos.

**Desventajas:**

1. Sólo es útil con combustibles de bajo contenido en azufre.
2. La localización de estas plantas se limita a zonas costeras.
3. Los gases deben ser enfriados o bien con intercambiadores regenerativos o con inyección previa de agua. Al final del proceso surge la necesidad de recalentamiento de los gases para garantizar su dispersión en la atmósfera, ya que operan a una temperatura de líquido inferior a 35 °C.
4. Necesidad de una balsa de aireación de gran superficie para oxidar los sulfitos disueltos en el agua a sulfatos e impedir su emisión a la atmósfera.
5. Ajuste previo del pH entre 8 y 8,3, y de la concentración de oxígeno disuelto antes del vertido, para no generar problemas medioambientales. Incremento de la concentración de sulfatos en el agua de mar de, al menos, un 1,5%.
6. Bombeo de grandes caudales de agua, por lo que el consumo eléctrico aumenta significativamente (Curiel Alegre, 2017).

**1.5 Estrategias para el control de las emisiones de SO<sub>2</sub> en las centrales termoeléctricas.**

Las principales estrategias para el control de las emisiones de gases de combustión en termoeléctricas consisten en la sustitución del combustible por otro de menor contenido en S o la instalación de depuradores.

Globalmente, en plantas termoeléctricas, el cambio de combustible representa 2/3 del control de SO<sub>2</sub>, mientras que los depuradores totalizan 1/3 de la reducción del SO<sub>2</sub> (Bósquez Yáñez, 2011).

Los depuradores húmedos son dispositivos de control de la contaminación del aire, eficaces para la eliminación de partículas y/o gases de escape de corrientes de escape industriales (POLLUTIONSYSTEMS., 2015). Algunos tipos de depuradores están diseñados principalmente para eliminar partículas contaminantes (por ejemplo, lavadores Venturi) y otros están diseñados para eliminar la mayoría de gases contaminantes o partículas solubles (por ejemplo, las torres empacadas y torres de bandejas). Los depuradores con lecho empacado, también llamados depuradores húmedos o torres de absorción, son piezas de equipos instalados en las plantas de energía para eliminar los gases seleccionados (y algunas veces también partículas) de humos de combustión con el fin de cumplir con las

normas de emisión (HLÛTERS, 2014). En su aspecto esencial, un depurador es un tanque vertical (torre) en el que el gas y el flujo de líquido fluyen a contracorriente uno contra el otro: la solución líquida fluye hacia abajo mientras que las burbujas de gas hacia la parte superior, cada uno se traslada bajo la acción de la gravedad.

Para maximizar el contacto entre el líquido y el gas, la torre también está llena de un gran número de pequeños objetos obligando a que el líquido se filtre lentamente por caminos tortuosos y el gas a subir en pequeñas burbujas. Como compiten el líquido y el gas por el espacio, se produce un contacto muy íntimo entre los dos y existe un área de contacto muy grande a través de la cual la transferencia de especies químicas puede tener lugar según la ecuación (ALVAREZ, 2014).

El lavado en húmedo es un proceso de dos etapas, siendo la primera etapa la captura del gas contaminante corriente en el líquido y el segundo paso es la separación de las gotas de líquido de lavado de la corriente de gas después de salir del depurador. Este paso es importante en la última colección de contaminantes debido a que la mala separación del líquido causará arrastre de las gotitas que contienen el contaminante (BASHIR, 2012). Teniendo la concentración de contaminante en la corriente de alimentación y las condiciones de operación del sistema objeto de estudio, se selecciona como equipo de depuración, para el caso particular de la URA, una torre empacada con una solución de hidróxido de sodio. Dicha selección obedece, en primer lugar, a la disponibilidad del secuestrante que se va a utilizar y que es suministrado por la unidad existente de preparación de reactivos químicos de la refinería. En segundo lugar, por la posibilidad de un tratamiento posterior para el residual resultante con una alta concentración de sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) de dicho proceso. Este tratamiento se realizará en la unidad existente de tratamiento de sosa gastada (SpentCaustic, SPC por sus siglas en inglés) (ALVAREZ, 2014).

Los depuradores húmedos más comunes son las torres de aspersion, los depuradores tipo venturi, las torres de platos y las torres empacadas.

### **1.6 Absorción de gases**

La absorción de gases es una operación básica que estudia las separaciones de uno o varios componentes de una mezcla gaseosa por disolución de un líquido. Por tanto, en esta

operación se efectúa el transporte de materia del componente a componentes de la fase gaseosa soluble en el líquido absorbente, desde la fase gaseosa a la líquida. El objetivo de esta operación suele ser purificar una corriente gaseosa para su procesamiento posterior o su emisión a la atmósfera, o bien, recuperar un componente valioso presente en la corriente gaseosa (Bósquez Yáñez, 2011).

La absorción aplicada a los procesos de purificación de gases puede clasificarse dependiendo de la interacción entre los componentes del gas y el absorbente (Salazar Peralta, 2012).

- ✓ **Absorción física:** en este proceso el componente a eliminar de la corriente de gas es más soluble en el líquido que los demás componentes, pero no hay reacción química con el absorbente. La concentración en la fase líquida depende de la presión parcial del componente en la fase gaseosa.
- ✓ **Absorción con reacción irreversible:** el producto de reacción que se forma no se descompone para regenerar el absorbente (Bósquez Yáñez, 2011).
- ✓ **Absorción con reacción reversible:** este tipo de absorción implica una reacción química entre el componente gaseoso que se absorbe y un componente de la fase líquida.

### 1.7 Equipamiento utilizado en procesos de absorción.

**Torres de plato:** se usan para grandes instalaciones de intercambio gas líquido para fluido limpio, no corrosivo, que no forme espumas y para flujos medio-bajos de líquido. Son aplicables también cuando se requiere refrigeración interna, pueden colocarse serpentines de refrigeración o enfriamiento con entrada y salida de líquido del plato. En la Tabla 1.2 se muestran los tipos de platos. Normalmente se usan platos perforados por su simplicidad y bajo costo. Los platos de campana se usan para un flujo de líquido muy bajo, pero pueden ser sustituidos por torres de relleno estructurados. En estas torres el líquido fluye horizontalmente por los platos y el gas fluye en sentido vertical a través de las aperturas de la bandeja. El líquido pasa de bandeja en bandeja a través de un bajante que ocupa aproximadamente del 5 al 20 % de la bandeja (Rangel, 2011).

**Tabla 1.2 Tipos de plato.**

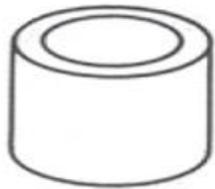
Tipo de plato	Característica
Platos de válvula	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operar eficazmente a velocidades bajas de vapor.</li> <li>• Son platos con orificios de gran diámetro cubiertos por tapaderas móviles que se elevan cuando el flujo de vapor aumenta.</li> </ul>
Platos perforados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los diámetros de los orificios están generalmente comprendidos entre 0,3 y 1,3 cm</li> </ul>
Platos de caperuza de borboteo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No permiten el goteo si están adecuadamente unidos a la torre.</li> <li>• Generan elevadas caídas de presión.</li> <li>• Las eficacias de etapa son de un 10-20 % inferiores que en platos perforados o de válvula.</li> <li>• Estos platos son más caros que los platos perforados y que los de válvula.</li> </ul>

**Torres rellenas:** las columnas de relleno son equipos cilíndricos que contienen en su interior un relleno cuyo objetivo es maximizar el área de contacto entre gas y líquido. El líquido se distribuye sobre éstos y escurre hacia abajo a través del lecho empacado, de tal forma que expone una gran superficie del contacto con el gas (Anexo A). Las torres empacadas tienen eficiencias de premonición de gases más altas que otros equipos, manejando caudales de gas residual más alto y menor cantidad de líquido de limpieza, son recomendadas para procesos con baja pérdida de carga, líquidos que formen espuma, pequeños diámetros de columna, altos caudales de líquido, fluidos corrosivos y para fluidos viscosos (Bósquez Yáñez, 2011).

Esta puede ser de madera, metal, porcelana química, ladrillo a prueba de ácidos, vidrio, plástico, metal cubierto de plástico o vidrio, u otro material, según las condiciones de corrosión. Para facilitar su construcción y aumentar su resistencia, generalmente son circulares en la sección transversal (Treybal, 1999). En la Tabla 1.3 se muestra la disposición de los empaques en la torre.

**Tabla 1.3 Disposición de los empaques en columnas rellenas.**Fuente:(Rivera Letelier, 2016).

Empaques al azar	Empaques regulares
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El relleno se arroja en la torre dejando caer en forma aleatoria, con el fin de prevenir la ruptura de empaques.</li> <li>• Bastante económico pues son de tipo metálico cerámicos o plásticos.</li> <li>• Los empaques al azar ofrecen superficies específicas mayores.</li> <li>• Debido a lo anterior existe mayores caídas de presión.</li> <li>• Puede llenarse inicialmente con agua para reducir la velocidad de caída (Figura 1.2).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El relleno está dispuesto de forma ordenada.</li> <li>• Instalación más costosa por unidad de volumen.</li> <li>• Proporcionan una superficie interfacial grande de líquido y gas en contacto.</li> <li>• Ofrecen menor caída de presión para el gas y un fluido mayor.</li> <li>• Menor pérdida de carga por etapa y tiene mayor eficiencia y capacidad (Figura 1.3).</li> </ul>



Anillo Raschig



Anillo Pall



Teleretas



Estribo de Berl



Estribo Intalox

**Fig. 1.2:Empaques al azar: metálicos, cerámicos y plásticos. Fuente:** (Nazaroff & Alvarez-Cohen, 2014).



**Fig. 1.3: Empaques estructurados. Fuente:** (Misari-Cuesta, 2011)

### Contenedores de empaques

Es necesario que se coloque una pieza para soportar el empaque en la parte superior de la torre. Pues, en regímenes de flujo de gas muy altos, los empaques podrían ser lanzados fuera de la torre, por lo que se deben sujetar con contenedores, dependiendo del empaque así será el contenedor (Bósquez Yáñez, 2011).

### Características de los empaques o rellenos

Los principales requisitos que debe cumplir el relleno de una columna de absorción son:

1. Químicamente inerte frente a los fluidos de la torre, proporcionando alta durabilidad y resistencia a la corrosión.
2. Resistente mecánicamente sin tener un peso excesivo lo cual permite el fácil manejo y la instalación.
3. Facilitar tanto la distribución uniforme del líquido sobre su superficie como el paso uniforme del vapor a través de toda la sección de la columna sin excesiva retención de líquido o caída de presión.
4. Proporcionar una superficie interfacial grande entre el líquido y el gas es decir lograr un buen contacto entre ambas fases.
5. Coste razonable(Bósquez Yáñez, 2011) .

### Material de relleno

Los materiales de empaque proporcionan una superficie húmeda grande para la corriente de gas, maximizando el área disponible para la transferencia de masa.

Estos se encuentran disponibles en una variedad de formas, cada una teniendo características específicas con respecto al área de superficie, caída de presión, peso, resistencia a la corrosión y costo.

Para construir estos rellenos se utilizan diversos materiales: cerámica, metales, plásticos y carbono.

La elección del material dependerá de la naturaleza de fluido y la temperatura de operación:

- El empaquetado cerámico es útil para líquidos corrosivos pero no para disoluciones fuertemente alcalinas.
- El plástico sólo debe usarse cuando no se sobrepasan temperaturas moderadas
- Los anillos de metal y plástico son más eficaces que los de cerámica puesto que sus paredes pueden ser más finas (Rangel, 2011).

### **Tamaño del empaque o relleno**

En general, el mayor tamaño de relleno aceptable en una columna es de 50 mm. Los tamaños más pequeños son más caros que los mayores, pero por encima de 50 mm la eficacia en la transferencia de materia disminuye considerablemente. El uso de partículas de relleno demasiado grandes puede causar una distribución pobre del líquido (Bósquez Yáñez, 2011).

### **Vida del empaque o relleno**

La vida del empaque varía dependiendo de la aplicación. En circunstancias ideales, el empaque durará tanto como la torre misma. En ambientes adversos, la vida del empaque puede ser tan corta como de 1 a 5 años debido a la corrosión, el ensuciamiento y al rompimiento (Rangel, 2011).

### **Distribuidores de líquido**

La distribución de líquido en la cima de la torre es esencial para una operación eficiente. Por lo tanto, los distribuidores de líquido son clave en el diseño de cualquier columna empacada (Strigle, 1994).

Un distribuidor de líquido debe proporcionar (Norton Chemical Process Product, 2001):

1. Distribución uniforme del líquido

2. Resistencia a la obstrucción o taponamiento
3. Gran flexibilidad a la variación en los flujos
4. Baja caída de presión
5. Mínima altura para permitir mayor espacio para el lecho
6. Capacidad para mezclar el líquido a distribuir

La distribución perfecta del líquido puede definirse como la provisión de líquido a igual velocidad por unidad de área de superficie del lecho. El líquido puede aplicarse mediante rociadores (spray), rebosaderos u orificios, a presión o por gravedad. Los rociadores pueden humedecer casi totalmente la superficie del empaque, pero la variación de flujo punto a punto es muy alta. Los distribuidores de rebosadero proveen corrientes discretas de igual flujo, pero es difícil controlar las variaciones en la carga. Al igual que los distribuidores de rebosaderos, los de tipo orificio proveen corrientes discretas de líquidos dirigidas directamente al empaque. Para asegurar una perfecta distribución se requeriría un número infinito de corrientes. Sin embargo, por ejemplo, en el caso de los distribuidores de orificio, el tamaño del orificio, los riesgos de obstrucción y consideraciones de carácter mecánico restringen su número (De la Hoz Siegler, 2003).

### **Ventajas**

1. Caída de presión relativamente baja.
2. Dependiendo del material de construcción, permite su operación en ambientes altamente corrosivos.
3. Eficiencia de transferencia de masa relativamente altas.
4. Se puede cambiar el tipo de empaque para aumentar la eficiencia.
5. Costo de inversión relativamente bajo.
6. Requisitos de espacio relativamente bajos.
7. Capacidad de recolectar MP y gases.

### **Desventajas**

1. Genera residuos industriales líquidos.
2. MP puede causar problemas de obstrucción en empaque y placas.
3. Dependiendo del material de construcción, son sensibles a la temperatura.
4. Costos de mantenimiento relativamente altos (Rangel, 2011).

### 1.7. Accesorios internos de las columnas.

**Placas anti-alto:** Se utilizan a veces para evitar salpicaduras del líquido sobre los tubos descendentes al pasar a una sección adyacente del mismo plato.

**Placas con hileras de púas:** Se colocan en la parte superior de los conductos de descenso o de los vertederos para romper la espuma y evitar su arrastre.

**Vertederos de entrada:** Se utilizan para asegurar el cierre de líquido en los conductos de descenso cuando se opera con elevados flujos de vapor o bajos flujos de líquido

**Colectores y cierres de entrada y salida:** Se utilizan para asegurar el cierre de líquido bajo todas las condiciones.

**Paneles de salpicaduras:** Se utilizan para prevenir salpicaduras y promover la uniformidad de flujo.

**Agujero de hombre:** El diámetro del agujero es un factor importante en el diseño de los platos, ya que afecta al número de piezas que se han de instalar y al diseño del plato.

**Cerchas, anillos y soportes:** En torres de gran diámetro los platos se soportan sobre viguetas acanaladas. El método a utilizar para sujetar los platos a la carcasa requiere experiencia y una cuidadosa planificación. Los platos deben de estar nivelados para asegurar una distribución uniforme del flujo (HLÛTERS, 2014).

### 1.8 Parámetros de diseño de una columna de absorción.

#### Tipo de contacto entre las fases.

La elección del tipo de contacto para la columna de absorción es un parámetro fundamental en el proceso. La función principal de este equipo es crear una elevada interface líquido-gas para mejorar el proceso de transferencia de materia. Normalmente se emplean los siguientes mecanismos:

- Dividir el gas en pequeñas burbujas que pasan por una fase de líquido continua (torres de plato).
- Difusión del líquido en columnas delgadas a través de un flujo continuo de fase gaseosa (columna de relleno).

- Dividir el líquido en pequeñas gotas que se difunden en una fase de gas continua (cámaras de aspersion)(Treybal, 1999).

### **Características del disolvente**

Como el propósito principal es eliminar algún componente del gas hay que tener presente las siguientes propiedades:

- Solubilidad del gas: Debe ser elevada, a fin de aumentar la rapidez de la absorción y disminuye la cantidad requerida del disolvente.
- Volatilidad: Debe tener una presión baja de vapor puesto que el gas saliente de una operación de absorción generalmente está saturado con el disolvente y, en consecuencia, puede perderse una gran cantidad.
- Corrosión: Los materiales de construcción que se necesitan para el equipo no deben ser raros o costosos.
- Costos: El disolvente debe ser barato, de forma que las pérdidas no sean costosas y deben obtenerse fácilmente.
- Viscosidad: se prefiere la viscosidad baja debido a la rapidez en la absorción, mejores características en la inundación en las torres de absorción, bajas caídas de presión en el bombeo y buenas características de transferencia de calor.
- Misceláneos: Si es posible, el disolvente no debe ser tóxico ni inflamable, debe ser estable químicamente y tener un punto bajo de congelamiento(Pérez Sánchez, 2019).

### **Otros parámetros.**

- La razón líquido-gas: cuanto menor sea este número menor cantidad de líquido lavador necesitamos y por tanto menor gasto y menor dimensionado de las instalaciones.
- pH: dependiendo del sistema empleado, el pH se debe mantener dentro de unos límites para asegurar una alta solubilidad de  $\text{SO}_2$  y la no formación de costras (Rivera Letelier, 2016).
- Velocidad del gas: para minimizar los costes los lavadores se diseñan a la máxima velocidad del gas posible, minimizando el tamaño de la vasija.

- Tiempo de residencia: el gas debe de permanecer dentro de la vasija el tiempo suficiente para que la mayor cantidad posible de SO<sub>2</sub> sea absorbida.
- Estimación del diámetro de la columna.
- Determinación de los coeficientes de transferencia de masa.
- Estimación de la caída de presión.
- Diseño de los accesorios internos (Salazar Peralta, 2012).

### **1.9 Macroalgas marinas.**

Las algas son un conjunto de vegetales talófitos cuyo ciclo biológico se desarrolla en el medio acuático. Están provistas de pigmentos que les permiten un modo de alimentación autótrofa y en alguna fase de su ciclo de vida permanecen fijadas al substrato marino, creando biotopos naturales más o menos homogéneos. Las algas, además de su gran interés ecológico, son los principales productores primarios del planeta y un recurso económico natural que presenta un amplio abanico de usos. Son capaces de elaborar sustancias orgánicas a partir de sustancias inorgánicas, transformando la energía luminosa que proviene del sol en energía química. En sus variedades, concentran todas las riquezas del mar: vitaminas, proteínas, aminoácidos, yodo, magnesio, potasio, hierro, selenio, zinc entre otros.

Por otra parte, las algas en su proceso de crecimiento y desarrollo metabólico, al igual que las plantas terrestres, durante la fotosíntesis consumen CO<sub>2</sub>, liberando simultáneamente O<sub>2</sub> a la atmósfera y purificándola. Ese principio, esencial para la vida en el planeta, puede ser intensificado si se incrementa la masa verde y en ese sentido, las algas juegan un papel primordial si se logra, además, captar de forma intensiva el CO<sub>2</sub> generado por la propia acción productiva del hombre, antes que escape a la atmósfera (BERMÚDEZ ACOSTA, 2014).

### **1.10 Parámetros que influyen en el cultivo intensivo de macroalgas.**

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

#### **pH**

El pH está generalmente determinado por la cantidad de iones de hidrogeno que se encuentra libres en la columna del agua y a su vez está influenciado por los procesos biológicos dentro de los ambientes acuáticos. Donde el pH afecta directamente los procesos

tanto químicos y biológicos del agua. La mayor parte de los organismos acuáticos requieren un rango de pH entre 6,5 y 8,5, en lo cual si se encuentran fuera de este rango suele haber una disminución en la diversidad, todo se da debido al estrés generado por los organismos no adaptados. Bajos valores de pH también pueden hacer que sustancias tóxicas se movilicen o se hagan disponibles para los vegetales marinos y animales (CUEVAS, 2001).

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 (ELISA, 2000).

### **Conductividad**

La conductividad es otro de los factores que afecta también la comunidad de las algas, este factor está relacionado directamente con el patrón de estratificación térmica de la columna de agua y con la permanencia de este período. En 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 trópicos 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 (JIMÉNEZ, 2002).

### **Turbidez**

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). 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 (PEÑA, 2011).

### **Luz solar**

En el medio acuático, cuando la luz del Sol alcanza la superficie del mar, una parte es manifestada nuevamente hacia la atmósfera. La fracción que atraviesa la superficie es absorbida progresivamente por la misma agua, las sustancias disueltas y, sobre todo, por la materia en suspensión, incluidos los organismos planctónicos.

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 (GARCÍA, 2008).

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.

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, 2010).

### **Temperatura**

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.

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(ÁVILA, 2011).

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).

### **Salinidad**

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 disueltos 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  $0,5 \times 10^{-6} \text{ mmol Kg}^{-1}$ .

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(ÄVILA, 2010).

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.

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 0,1-2,0 ppm.

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(PFAFFLIN, 2010).

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

Muchos estudios realizados sobre el cultivo de las algas han indicado que estas crecen más rápido en los ambientales de CO<sub>2</sub> elevado. La elevación en la concentración de este gas favorece el aumento del proceso de fotosíntesis y la producción de biomasa (OILGAE, 2006).

Kublen(1999)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 esta concentración del CO<sub>2</sub> ambiental, se observada producción de biomasmayores del 52 y 314%.

Tisserat ( 2001)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> de3000 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.

### **1.11 Empleo 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.

Según 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 CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Anexo B).

Se plantea que el CO<sub>2</sub> necesario para el cultivo puede ser obtenido de los gases de combustión de procesos industriales como termoeléctricas, pero el CO<sub>2</sub> 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 (RODRIGUEZ, 2012).

En un cultivo de algas, entre un 20 y un 50% del CO<sub>2</sub> suministrado es asimilado, mientras que el resto se pierde a la atmósfera. Por esta razón es ridículo pensar en el suministro de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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).

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).

### **Conclusiones parciales**

1. El método más adecuado de tratamiento de los gases de combustión para su empleo como nutriente en el cultivo intensivo de macroalgas marinas es el de post-combustión.
2. 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.
3. Las torres de relleno son las más adecuadas para el tratamiento de gases de combustión.

## **Capítulo 2: Diseño de una columna de absorción del SO<sub>2</sub> de los gases de combustión.**

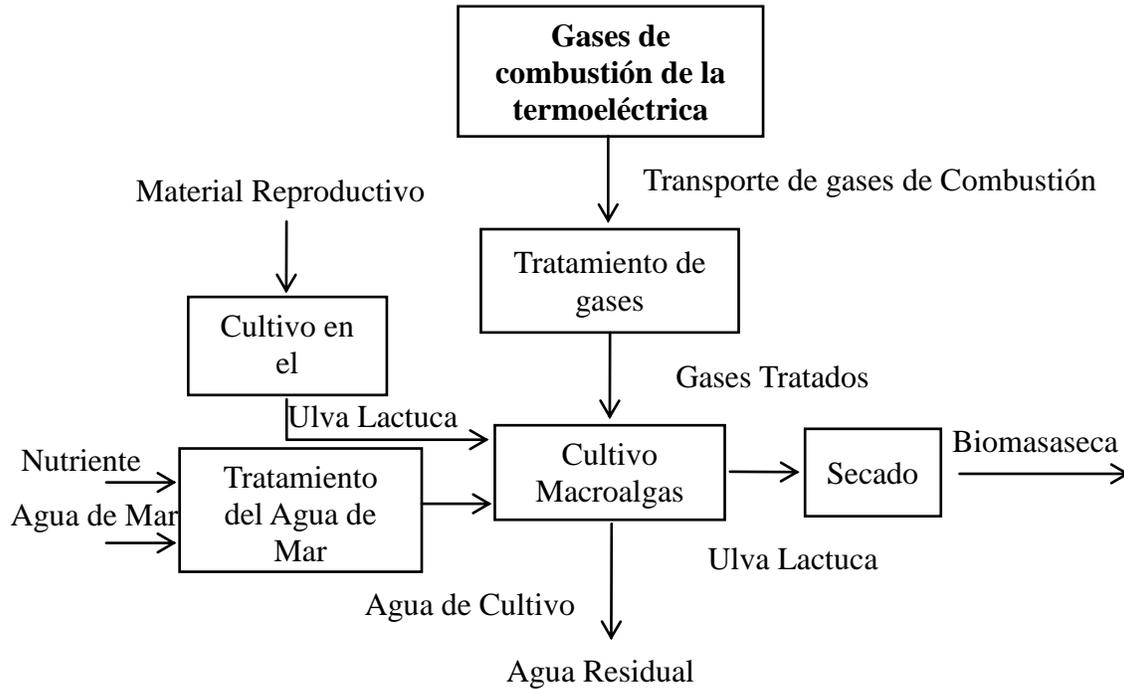
La Empresa Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” de la provincia de Cienfuegos, es una de las fábricas que emite gran cantidad de gases de combustión a la atmósfera. Actualmente se desarrolla un proyecto de investigaciones encaminada a mitigar la contaminación por el CO<sub>2</sub> residual de los gases de combustión generados en la Termoeléctrica, a través del desarrollo de una instalación para el cultivo intensivo de la macroalga “*Ulva Lactuca*”, que constituye una fuente natural autóctona en la bahía de Cienfuegos.

### **2.1 Proceso de cultivo de macroalga *Ulva Lactuca*.**

El cultivo de macroalga a escala de laboratorio, se realiza en un tanque rectangular tipo pecera, simulando un biorreactor Continuo con Agitación (RCCA), el cual se mantiene con un flujo de alimentación de agua de mar constante, asegurando una operación continua estacionaria, con un tiempo de renovación de 12 horas, el flujo de aire de instrumentación de la fábrica y de gases de combustión que pasaran por una minicolumna de absorción de absorción son mezclados, con una concentración de CO<sub>2</sub> en los gases de 760 ppm y 3000 ppm, que a su vez constituyen el medio de agitación. Al agua procedente de los enfriadores de agua de mar de la empresa suministrada al biorreactor se la añade (nutrientes); Nitrato de Sodio y Fosfato de Sodio, para enriquecer el medio de cultivo para garantizar una calidad adecuada y lograr un mayor rendimiento en el cultivo de algas en un menor periodo de tiempo.

Para realizar el estudio se selecciona la especie de alga *Ulva Lactuca*, más conocida como Lechuga de Mar (Anexo C), la cual se extrae de su habitat natural, (Bahía de Cienfuegos). El principal objetivo de la investigación es evaluar una estación experimental ubicada por primera vez en la termoeléctrica, utilizando los gases de combustión y aumentando la concentración del CO<sub>2</sub> en los gases, teniendo en cuenta las características del agua de mar a emplear y su recirculación al biorreactor, para la determinación de la eficiencia en el proceso de cultivo de la macroalga manteniendo el control del flujo de gases y agua y comparar.

En la Figura 2.1 se muestra el proceso de cultivo de macroalga *Ulva Lactuca*.

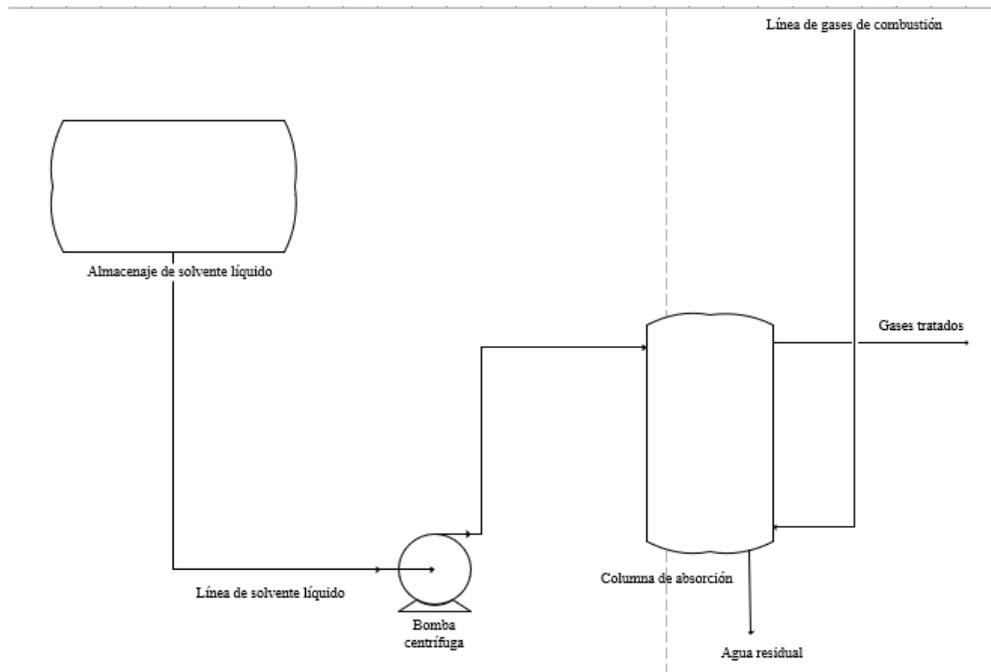


**Fig. 2.1: Proceso de cultivo de macroalga Ulva Lactuca**

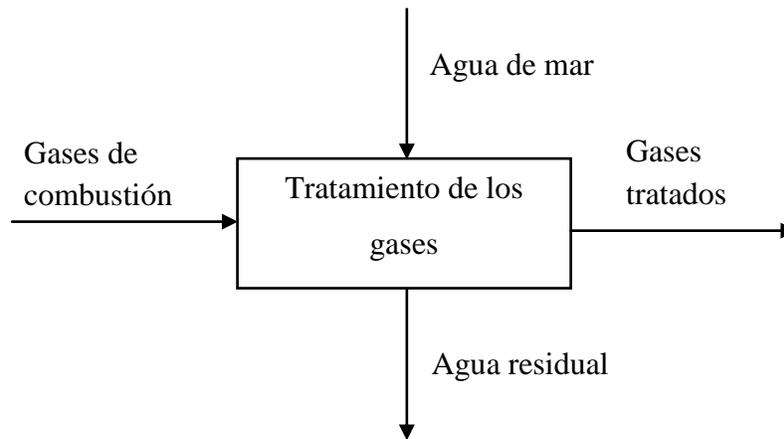
## 2.2 Descripción del proceso a desarrollar

El diseño de instalación de la torre estará constituido por un sistema de tuberías que llevará el agua desde los enfriadores de agua de mar de la empresa hasta la columna la que estará situada a unos 80 metros de estos, pasando esta por una bomba para obtener mayor eficiencia en el proceso (Figura 2.2). Se decidió que el suministro fuera de estos enfriadores ya que estas corrientes de agua tienen un cierto tratamiento, al haber pasado por el proceso de producción de la termoeléctrica. Para el suministro de gases a la columna, se desviará parte del gas de combustión que circula por el conducto de descarga a la chimenea, a la salida del conducto del calentador regenerativo (nombrado en la empresa “pantalón de gases”) hasta la columna. En la columna de absorción, serán dichos gases tratados para absorber la mayor cantidad de SO<sub>2</sub> contenida en ellos, para luego este gas limpio ser utilizado en el cultivo intensivo de la macroalga “Ulva Lactuca” (Figura 2.3).

El objetivo es el acondicionamiento de los gases mediante su lavado con agua de mar para eliminar el material particulado, SO<sub>2</sub> y otros elementos que puedan traer efectos negativos para el cultivo de las macroalgas, por la absorción con reacción química que se produce por el contacto con algunas sustancias del agua de mar.



**Fig. 2.2: Sistema de instalación de la torre de absorción.**



**Fig. 2.3: Principio de funcionamiento de la columna a desarrollar**

### 2.3 Elección del tipo de torre a utilizar.

Las torres empacadas tienen eficiencias de premonición de gases más altas que otros equipos, manejando caudales de gas residual más alto y menor cantidad de líquido de limpieza, son recomendadas para procesos con baja pérdida de carga, líquidos que formen espuma, pequeños diámetros de columna, altos caudales de líquido, fluidos corrosivos y para fluidos viscosos.

#### 2.4 Selección del solvente.

Los disolventes más utilizados para la absorción de SO<sub>2</sub> son agua, soluciones acuosas de carbonatos alcalinos, soluciones acuosas de hidróxidos alcalinos, soluciones o salmueras de amoníaco y agua, soluciones acuosas de etanolaminas y soluciones acuosas de azidas alcalinas. Se toma como disolvente el agua de mar por la disponibilidad del absorbente es muy grande y con bajo coste económico, no se generan residuos sólidos. La solubilidad de SO<sub>2</sub> en agua de mar es de 9,4 g/100 gH<sub>2</sub>O (CUEVAS, 2001).

#### Evaluación de los datos de equilibrio.

Datos de equilibrio de SO<sub>2</sub> en agua de mar a 25 °C en fracción peso (Tabla 2.1) (Bósquez Yáñez, 2011).

**Tabla 2.1: Datos de equilibrio.**

x (gSO <sub>2</sub> /100g H <sub>2</sub> O)	y (mmHg)
0,005	0,02
0,012	0,05
0,032	0,1
0,141	0,3
0,26	0,5
0,39	0,7
0,59	1
0,92	1,5
1,61	2,5
3,66	5
5,17	7,5

En la Figura 2.4 se presenta el gráfico de los datos de equilibrio del SO<sub>2</sub> en agua de mar.

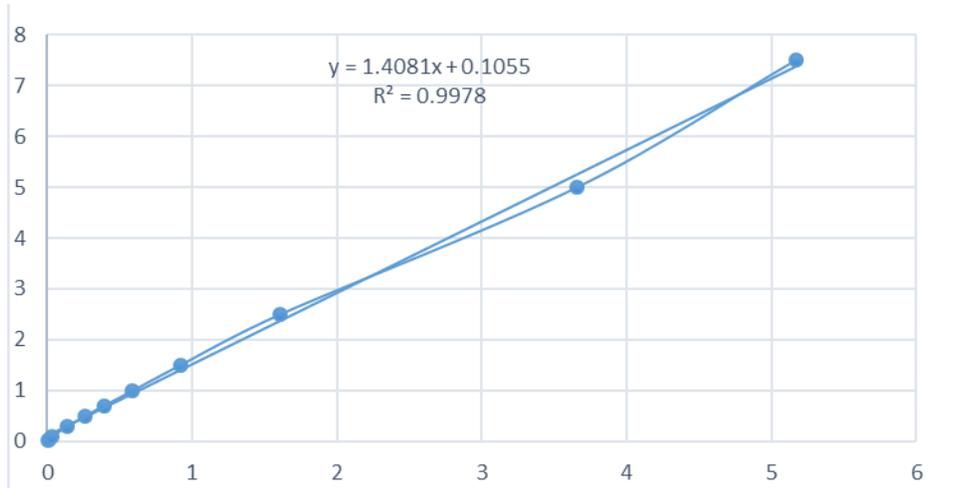


Fig. 2.4: Representación gráfica de datos de equilibrio del SO<sub>2</sub> en agua de mar.

### 2.5 Balance de materiales del proceso de absorción.

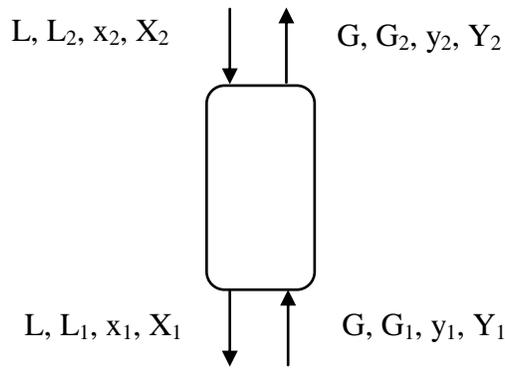


Fig. 2.5: Balance de materia

Cuando se diseña una columna de absorción no se conoce la cantidad de solvente a emplear en la operación (Figura 2.5). Para su determinación se calcula la máxima concentración de SO<sub>2</sub> que se puede absorber por el solvente a la salida de la columna (X<sub>1máx.</sub>). Esta concentración máxima se obtiene cuando se alcanza el equilibrio entre el gas entrante y el líquido solvente en el fondo de la columna, por lo que dicha concentración se determina a partir de la ecuación de la línea de equilibrio del sistema, según la siguiente expresión:

$$y_1 = m \cdot x_{1máx} \quad (2.1)$$

Capítulo 2: Diseño de una columna de absorción del SO<sub>2</sub> de los gases combustión.

Una vez calculada la máxima concentración de SO<sub>2</sub>(g) a la salida de la columna, se determina la mínima cantidad de solvente (L<sub>smín</sub>), necesaria para llevar a cabo la operación de absorción.

$$\left(\frac{L_S}{G_S}\right)_{min} = \frac{(Y_1 - Y_2)}{(X_{1máx} - X_2)} \quad (2.2)$$

$$L_{smin} = \frac{G_S(Y_1 - Y_2)}{(X_{1max} - X_2)} \quad (2.3)$$

Donde:

L<sub>S</sub>: Flujo de solvente sin SO<sub>2</sub>, (masa/tiempo).

G<sub>S</sub>: Flujo de gas sin SO<sub>2</sub>, (masa/tiempo) y se determina como:

$$G_S = G(1 - y)$$

(2.4)

X<sub>1máx</sub>: La relación molar del SO<sub>2</sub> se determina por:

$$X_{1máx} = \frac{Y_{1-0,1055}}{m} \quad (2.5)$$

Al tocar la línea de operación de pendiente mínima a la curva de equilibrio, en un punto cesa la transferencia de masa, por lo que debe operarse la columna con un flujo de solvente superior al que se obtiene a partir de esta línea.

El flujo de solvente de operación se obtiene según el criterio de (TREYBAL, 1977)

$$L_s = \varphi L_{min} \quad (2.6)$$

Finalmente se determina la concentración de SO<sub>2</sub> para las nuevas condiciones.

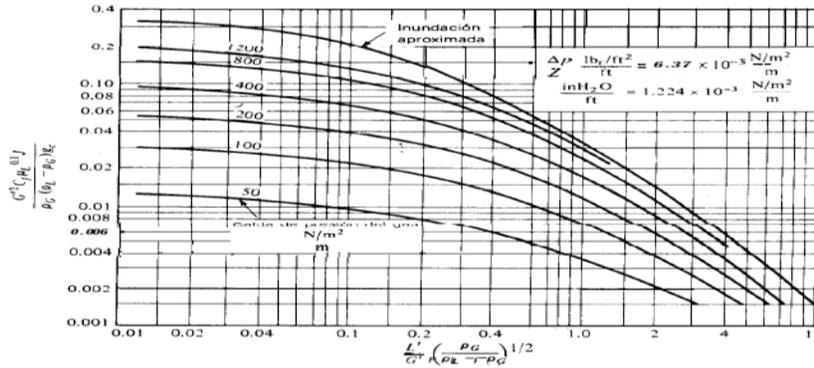
En la Tabla 2.2 se muestran los principales datos y resultados de los cálculos para obtener el flujo mínimo de solvente líquido.

**Tabla 2.2: Datos y cálculos para el flujo mínimo de solvente líquido**

Variable	Resultado
X1	1,153
x <sub>1</sub>	0,536
X <sub>2</sub>	0
x <sub>2</sub>	0
y <sub>1</sub>	0,104
y <sub>2</sub>	0,002
X <sub>1máx</sub>	0,0075
L <sub>smín</sub> (kg/s)	0,195
L <sub>s</sub> (kg/s)	0,174

## 2.6 Cálculo del diámetro de la columna

La velocidad másica superficial del gas bajo condiciones de inundación se obtiene al trabajar con la Figura 2.6 que se muestra a continuación, la misma se utiliza para predecir las condiciones a las que ocurre la inundación de la columna.



**Fig. 2.6: Inundación y caída de presión en torres rellenas. Fuente(TREYBAL, 1977).**

1. Calcular el valor de la abscisa:

$$\frac{L'}{G'} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_L}} \quad (2.7)$$

Donde:

L': Flujo del líquido en el fondo de la torre

G': Flujo del gas en el fondo de la torre

$\rho_g$ : Densidad del gas

$\rho_L$ : Densidad del líquido

$$\frac{L'}{G'} = \frac{L_1}{G_1}$$

Debido a que las velocidades másicas del líquido y el gas (L' y G') respectivamente, se determinan como, flujo másico entre área de la sección transversal y como esta área es constante, la relación anterior se cumple.

2. Obtener el valor de la ordenada, reorganizar la ecuación y calcular la velocidad másica superficial de inundación.

$$G_{inund} = \left( \frac{y \rho_G (\rho_L - \rho_G)}{C_f \mu_L^{0.1}} \right) \quad (2.8)$$

### Selección del tipo de relleno

Se seleccionan anillos Rasching de cerámica de 1 pulgde forma cilíndrica, para el relleno de la columna. En la Tabla 2.3 se muestran las características de los rellenos.

Los anillos de cerámica Rasching (Anexo D) pueden resistir altas temperaturas, ácidos, álcalis, sal y varios solventes orgánicos. Se aplica ampliamente en varias torres de embalaje de desorción, absorción, enfriamiento, lavado y regeneración. Estos mantienen una buena eficiencia y economía. Si su tamaño es inferior a 90 mm el anillo Rasching se apila aleatoriamente en la columna.

**Tabla 2.3: Características de rellenos volcados al azar Fuente (TREYBAL, 1977)**

Empaque	Tamaño nominal, mm (in)										
	6 (¼)	9.5 (¾)	13 (½)	16 (¾)	19 (¾)	25 (1)	32 (1¼)	38 (1½)	50 (2)	76 (3)	89 (3½)
Anillos de Raschig											
<b>Cerámica:</b>											
Espesor de pared, mm	0.8	1.6	2.4	2.4	2.4	3	4.8	4.8	6	9.5	9.5
$C_f$	1600	1000	580	380	255	155	125	95	65	37	37
$C_D$			909	749	457	301		181.8	135.6		
$\epsilon$	0.73	0.68	0.63	0.68	0.73	0.73	0.74	0.71	0.74	0.78	0.78
$a_p, m^2/m^3 (ft^2/ft^3)$	787 (240)	508 (155)	364 (111)	328 (100)	262 (80)	190 (58)	148 (45)	125 (38)	92 (28)	62 (19)	62 (19)
<b>Metal</b>											
0.8 mm pared											
$C_f$	700	390	300	170	155	115					
$\epsilon$	0.69		0.84		0.88	0.92					
$a_p, m^2/m^3 (ft^2/ft^3)$	774 (236)		420 (128)		274 (83.5)	206 (62.7)					
1.6 mm pared											
$C_f$			410	290	220	137	110	83	57	32	32
$C_D$			688	431	485	304		172.9	133.5		
$\epsilon$			0.73		0.78	0.85	0.87	0.90	0.92	0.95	0.95
$a_p, m^2/m^3 (ft^2/ft^3)$			387 (118)		236 (71.8)	186 (56.7)	162 (49.3)	135 (41.2)	103 (31.4)	68 (20.6)	68 (20.6)

Donde:

y: ordenada

$\rho_L$ : densidad del líquido

$\rho_G$ : densidad del gas

$C_f$ : coeficiente del relleno

$\mu_L$ : viscosidad del líquido

3. Calcular la velocidad másica superficial de operación.

$$G_{ope} = (0,6 - 0,75)G_{ind}(2.9)$$

4. Área transversal de la columna (A)

$$A = \frac{G_1}{G_{ope}}(2.10)$$

5. Diámetro de la columna (d)

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}(2.11)$$

En la Tabla 2.4 se muestran los resultados de los cálculos realizados durante el epígrafe para obtener el diámetro de la columna.

**Tabla 2.4: Datos y cálculo para el diámetro de la columna**

Variable	Resultado
$\rho_{gas}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,450
$\rho_{líquido}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1027
ordenada	0,22
Cf	160
m	1,40
$G_{inund}$ (kg/s m <sup>2</sup> )	42,430
$G_{ope}$ (kg/s m <sup>2</sup> )	25,458
A (m <sup>2</sup> )	0,0007
D (m)	0,0268

## 2.7 Altura de la columna

La altura de una columna de relleno se calcula determinando el número de unidades teóricas de separación que se requieren y multiplicándolo por la altura de relleno que ejerce la misma acción que una unidad teórica de separación. En operaciones continuas en contracorriente de contacto diferencial la unidad teórica de separación se denomina unidad de transferencia y la altura de relleno equivalente en su acción de dicha unidad, altura de una unidad de transferencia.

$$Z = N_{TOG} \cdot H_{TOG}(2.12)$$

### Determinación del número de unidades de transferencia

El número de unidades de transferencia  $N_{GT}$ , es igual a

$$N_{TOG} = \frac{Y_1 - Y_2}{(y - y^*)_M} \quad (2.13)$$

Donde:

$Y_1$  y  $Y_2$ : relaciones molares del gas que se calculan a partir de sus respectivas fracciones molares.

$$Y_1 = \frac{y_1}{1 - y_1} \quad (2.14)$$

$$Y_2 = \frac{y_2}{1 - y_2} \quad (2.15)$$

$(y - y^*)_M$ : es la media logarítmica entre la composición del líquido y la composición en el equilibrio.

$$(Y - Y^*)_M = \frac{(Y - Y^*)_1 - (Y - Y^*)_2}{\ln \frac{(Y - Y^*)_1}{(Y - Y^*)_2}} \quad (2.16)$$

Donde:

$y_1^*$ ,  $y_2^*$ : composiciones molares del gas en equilibrio.

### Estimación de la altura de unidades de transferencia

$$H_{TOG} = \frac{\bar{G}}{K_{ya} (1 - y^*)_M} \quad (2.17)$$

Donde:

$\bar{G}$ : flujo promedio piramidal de área de la sección transversal.

$K_{ya}$ : coeficiente global volumétrico de transferencia de masa referido al gas.

$(1 - y^*)_M$ : promedio logarítmico.

$$\bullet \quad \bar{G} = \frac{G_1^0 + G_2^0}{2} \quad (2.18)$$

$$G_1^0 = \frac{G_1}{A} \quad (2.19)$$

$G_1$ : flujo de gas que entra por la parte inferior de la torre.

$$G_2^0 = \frac{G_S (1 + y_2)}{A} \quad (2.20)$$

$$G_S = G_1 * (1 - y_1) \quad (2.21)$$

$$\bullet \quad (1 - y^*)_M = \frac{(1 - y^*)_1 + (1 - y^*)_2}{2} \quad (2.22)$$

$$(1 - y^*)_{1M} = \frac{(1 - y_1) - (1 - y_1^*)}{\ln\left(\frac{1 - y_1}{1 - y_1^*}\right)} \quad (2.23)$$

$$(1 - y^*)_{2M} = \frac{(1 - y_2) - (1 - y_2^*)}{\ln\left(\frac{1 - y_2}{1 - y_2^*}\right)} \quad (2.24)$$

Donde:

Z: altura de empaque irrigado.

N<sub>TOG</sub>: número de unidades de transferencia para la fase gaseosa.

H<sub>TOG</sub>: altura de una unidad de transferencia para la fase gaseosa.

y<sub>1</sub><sup>\*</sup>, y<sub>2</sub><sup>\*</sup>: composiciones molares del gas en equilibrio.

Y<sub>1</sub><sup>\*</sup>, Y<sub>2</sub><sup>\*</sup>: relaciones molares del gas en equilibrio.

(1-y)<sub>M</sub><sup>\*</sup>: Promedio logarítmico de 1-y y 1-y<sup>\*</sup>.

(y-y<sup>\*</sup>) o (Y-Y<sup>\*</sup>): la distancia vertical entre la línea de operación y la curva de equilibrio.

En la tabla 2.5 se muestran los resultados de los cálculos realizados en el epígrafe con el objetivo de obtener la altura de la columna.

**Tabla 2.5: Datos y cálculos para la altura de la columna.**

<b>Variables</b>	<b>Resultados</b>
Kya(kg mol/m <sup>2</sup> h)	0,39
N <sub>TOG</sub>	0,351
Y <sub>1</sub>	0,860
Y <sub>2</sub>	0,106
(Y-Y <sup>*</sup> ) <sub>M</sub>	0,324
H <sub>TOG</sub> (m)	1,979
$\bar{G}$	1,297
G <sub>1</sub> <sup>0</sup>	25,458
G <sub>2</sub> <sup>0</sup>	22,863
G <sub>S</sub>	0,013
(1 - y <sup>*</sup> ) <sub>M</sub>	1,681
z (m)	0,694

## 2.8 Cálculo de la pérdida de presión

Se ha propuesto un cierto número de métodos para calcular la pérdida de presión de un gas que circula a través de un lecho de relleno, pero se tiene poca información para el caso de que, simultáneamente, exista una circulación descendente de líquido en la columna, el procedimiento que generalmente se sigue es el siguiente.

**Pérdida de presión a través de relleno seco,  $\Delta P_s$**

$$\Delta P'_s = \frac{R'}{\rho_G u'^2} * \frac{a'Z}{\epsilon^3} * \frac{\rho_G u'^2}{g} \quad (2.25)$$

Donde

$\Delta P'_s$ : pérdida de presión a través de relleno seco.

$R'$ : componente de la fuerza de rozamiento por unidad de superficie de partícula en la dirección del movimiento.

$u'$ : velocidad media del gas en los poros.

$\rho_G$ : densidad del gas.

$a'$ : superficie de relleno por unidad de volumen de lecho de relleno =  $a_0'(1-\epsilon)$ .

$a_0'$ : superficie específica del relleno.

$\epsilon$ : fracción de hueco.

$z$ : altura de relleno.

$u$ : velocidad del gas.

$g$ : aceleración debido a la gravedad.

El factor de rozamiento,  $R'/\rho_G u'^2$  viene dado por la siguiente relación

$$\frac{R'}{\rho_G u'^2} = \frac{5}{Re'} + \frac{1.0}{(Re')^{0.1}} \quad (2.26)$$

Donde

$$Re' = \frac{\rho_G u}{a' \mu_G}; \text{ número de Reynolds modificado} \quad (2.27)$$

El resultado de  $\Delta P'_s$  deberá ser multiplicado por el factor de corrección por efecto de pared,  $F_p$

$$\Delta P_s = F_p * \Delta P'_s \quad (2.28)$$

### **Pérdida de presión a través de relleno irrigado**

La pérdida de presión a través de relleno irrigado se calcula multiplicando la pérdida de presión a través de relleno seco por un factor de corrección  $F_L$ .

$$\Delta P_i = F_L * \Delta P_s \text{ (2.29)}$$

**Pérdida de presión total en la columna**

$$\Delta P_{total} = \Delta P_s + \Delta P_i \text{ (2.30)}$$

En la tabla 2.6 se muestran los resultados de los cálculos realizados para obtener la caída de presión de la columna.

**Tabla 2.6: Datos y cálculo para la caída de presión en la columna**

Variable	Resultados
Re'	3 6492,05044
$\Delta P'_s$ (Pa)	3 344,806688
Fp	0,835
$\Delta P_s$ (Pa)	2 792,914
Fl	1,5
$\Delta P_i$ (Pa)	4 189,370
$\Delta P_{total}$ (Pa)	6 982,284

**2.9 Resumen del diseño de la torre**

Para la sección de acondicionamiento de gases se diseña una torre rellena de absorción con anillos Rasching de cerámica de 1pulg. Dicha columna debe tener una altura de 0,694 m y un diámetro de 0,0268 m para la absorción del SO<sub>2</sub> de un flujo de gases de 0,014 kg/s.

**2.10 Selección del equipo de bombeo**

Para el transporte del agua que se utilizará en la columna se seleccionó la bomba centrífuga SIL 80X55 (Anexo E), se seleccionó dicha bomba realizando un balance de energía mecánica en la sección desde los enfriadores donde se encuentra el agua hasta la columna como se muestra en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.4: Balance de energía mecánica**

Datos	Ecuación	Resultado
Q=0,00420 m <sup>3</sup> /s L=80m v=1,941 m/s DN=0,060 m f=0,073	$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\alpha \Delta V^2}{2g} + h_{pt}$	H= 22,152 m

*Capítulo 2: Diseño de una columna de absorción del SO<sub>2</sub> de los gases combustión.*

$\Delta z = -1 \text{ m}$ $\Delta P = 405,3 \text{ Pa}$ $\Delta v = 0$		
--	--	--

### **Conclusiones Parciales**

1. Para la absorción del SO<sub>2</sub> de los gases de combustión se selecciona el agua de mar pues permite alcanzar entre un 85 y un 95 % de remoción para bajos niveles de concentraciones de SO<sub>2</sub> en los gases como en este caso y además es el solvente más económico y de fácil adquisición en este caso.
2. La torre de absorción debe tener una altura de 0,694 m y un diámetro de 0,0268 m para la absorción del SO<sub>2</sub>.
3. La torre operará con un flujo de gases a la entrada de 0,014 kg/s y un flujo de agua a la entrada de 0,390 kg/s.

**Capítulo 3: Análisis económico de la instalación propuesta.**

El análisis económico se basa en la determinación del costo de inversión y de operación de la sección del acondicionamiento de los gases de combustión.

**3.1 Costo de adquisición del equipamiento**

En la tabla 3.1 se muestran los datos del costo por equipos a utilizar en dicha instalación.

**Tabla 3.1: Costo del equipamiento para instalación requerida.**

**Fuente:**(www.alibaba.com, s.f.)

Equipos	No Equipos	Costo unitario(\$/u)	Costo total (\$)
Columna de absorción	1	400	400
Tanque para agua de mar	1	10	10
Tanque colector residual liquido	1	10	10
Bomba centrífuga	1	90	90
Compresor de los gases acondicionados.	1	25	25
Balón de almacenamiento de gases	1	15	15
		CE	550,000

Los tanques para almacenar agua (Anexo F) fueron escogido puesto que su material de construcción es PVC, óptimo para almacenar el solvente a utilizar con una capacidad 5000 L. Resistente a colisiones, al envejecimiento, control de algas perfecto y de fácil limpieza.

El compresor (Anexo G) seleccionado posee un cuerpo de hierro fundido pesado, válvula de alta fiabilidad y duradera, el motor proporciona una fuente confiable, arranque de bajo voltaje y funcionamiento.

**3.2 Costo total de inversión (CTI)**

Los datos fueron obtenidos de la tabla 17 (Peters, 1991).

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

$$I_{\text{Trabajo}} = 75 \% CE$$

$$CFI = \text{Costos Directos (CD)} + \text{Costos Indirectos (CI)}$$

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 3.2. Este es la suma de los costos de los equipos hallados anteriormente (Tabla 3.1).

**Tabla 3.2: Factores de costo y cálculo del CTI**

<b>Costo Directo (CD)</b>	<b>% del CE</b>	<b>Valor \$</b>
Costo Equipos (CE)	Valor estimado	550
Costo Tub. y accesorios	31	170,500
Instrument. y control (IC)	26	143,00
Instalación Eléctrica (IE)	10	55,000
Costo Edificación	29	159,500
Serv. y facilidades (SF)	55	302,50
<b>Total Costo Directo (CD)</b>		<b>1380,50</b>

<b>Costo Indirecto (CI)</b>	<b>% del CD</b>	<b>Valor \$</b>
Ing. y Supervisión	10	138,05
Gastos de Contratación	7	96,64
Contingencias	9	124,25
<b>Total Costo Indirecto (CI)</b>		<b>358,93</b>
<b>Capital Fijo de Inversión</b>	<b>CD+CI</b>	<b>1739,43</b>
<b>Inversión de trabajo</b>	<b>75%CE</b>	<b>412,50</b>
<b>Costo Total de Inversión</b>		<b>2151,93</b>

### 3.3 Costo total de acondicionamiento de los gases de combustión.

Para la estimación del costo total de acondicionamiento las Tablas 3.3-3.5, muestran el resultado del costo de producción. La mano de obra se calcula basado en el gasto financiero por concepto de salario medio mensual de un operador; el servicio principal considerado es el consumo de corriente eléctrica, se asume un % del costo de inversión para gastos de mantenimiento, reparaciones y mano de obra; la depreciación se determina con la relación costo de inversión/vida útil, considerando 8 años de vida útil de la sección y los costos de distribución y venta se determinaron considerando que representan un % del costo de producción (Peters, 1991).

$$CTP = \text{Costo directo (CD)} + \text{Cargos fijos (CF)} + \text{Gastos Generales (GG)}$$

Capítulo 3: Análisis económico de la instalación propuesta.

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

VR es el valor residual que se asume igual a cero y Vd es la vida útil igual a 8 años.

**Tabla 3.3: Cálculo de CDP(Peters, 1991)**

<b>Costo Fabricación</b>	<b>%</b>	<b>Valor \$/año</b>
Materias Primas (MP)		No hay
Utilidades (U)		No hay
Mano de obra (MO)		720
Supervisión (S)	15 % MO	108
Mantenimiento (M)	2 % CFI	34,79
Suministro (Su)	5 % CFI	86,97
Gastos de laborat. (GL)	7 % MO	504
<b>Total CDP</b>		<b>1453.76</b>

**Tabla 3.4 Cálculo de Cargos Fijos**

<b>Cargos Fijos (FC)</b>	<b>%</b>	<b>Valor \$/año</b>
Depreciación (D)		217,43
-Seguros, Impuestos (SI)	2 % CFI	34,79
<b>Total FC</b>		<b>252.22</b>

**Tabla 3.5 Cálculo de GG**

<b>Gastos Generales (GG)</b>	<b>Valor \$/año</b>
Total GG	89,907
<b>Costo Total de Producción</b>	<b>1795,88</b>

### **Conclusiones parciales Capítulo 3**

1. Para el análisis económico se estiman los costos de inversión y de operación de la etapa de acondicionamiento de los gases de combustión para el cultivo intensivo de la macroalga marina “Ulva Lactuca”
2. Para el diseño de la columna de absorción a escala de laboratorio se necesita invertir \$ 2151,93.
3. Con la materialización de la columna para el acondicionamiento de los gases de combustión se obtiene un costo de operación de 1 795,88 \$/año.

## Conclusiones

1. A partir del análisis bibliográfico se determinó que un sistema de desulfuración, por absorción del  $\text{SO}_2$ , en una columna rellena es una opción adecuada para el tratamiento de los gases de combustión.
2. Se seleccionó el agua de mar como solvente para la absorción del  $\text{SO}_2$  a escala de laboratorio pues este último presenta una alta solubilidad en el agua de mar la cual se adecúa perfectamente a las condiciones del proceso y su economía.
3. Se diseñó una columna rellena con anillos Rasching de cerámica de 1 pulg con un diámetro de 0,0268 m; una altura de 0,694 m con una caída de presión 6982,284 Pa para la limpieza del  $\text{SO}_2$  presente en los gases de combustión.
4. A partir del análisis económico se determinó que el costo de inversión y de operación de la instalación propuesta para el acondicionamiento de los gases de combustión a escala de laboratorio es de \$ 2151,93 y 1 795,88 \$/año respectivamente.

## **Recomendaciones**

Se recomienda:

1. La confección, diseño y experimentación del sistema de acondicionamiento del agua de mar propuesto.
2. La valoración y comparación del uso de columnas tipo spray o columnas de borboteo como otros tipos de columna para la desulfuración de los gases de combustión.
3. Proponer un sistema de tratamiento del residual líquido producto de la absorción del  $\text{SO}_2$  de los gases de combustión con agua de mar.

## Bibliografía

- ALVAREZ, C. M. ( 2014). *Flue-gas desulfurization ("Scrubbers")*. Recuperado el 2020 de enero de 28, de Dartmouth. Thayer School of Engineering, Section 7 C.2 and Section 12.8.2.: <https://engineering.dartmouth.edu>
- Arturo Rodas, G. B. (s.f.). *"Tecnologías de desulfurización"*.
- ÁVILA, M. C. (2011). *Manual de cultivo de algas comestibles*.
- ÁVILA, M. M. (2010). *Manual de cultivo de algas pardas*.
- BASHIR, A. D. (diciembre de 2012). Performance evaluation of wet scrubber system for industrial air pollution control. *Engineering and Applied Sciences., VOL. 7(NO. 12)*.
- BERMÚDEZ ACOSTA, J. (2014). *Estudio y desarrollo del cultivo de micro algas y cianoprocariotas (cianobacterias) para la captación de dióxido de carbono y la obtención de biomasa en el municipio de Cienfuegos*. Cienfuegos.
- Bósquez Yáñez, D. ., (2011). *Diseño y construcción de una torre de absorción para el análisis de SO<sub>2</sub> en gases de combustión*. Ecuador.
- 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*.
- Castañeda, L. C. (2005). *Tendencias Tecnológicas en el hidropesamiento de Crudos y fracciones pesadas*. Guanajuato.
- Cooper, D. A. (2011). *Air Pollution Control: A Design Approach* . (4th Edition ed.). Waveland Press.
- Córdoba, P. (2015). *Status of flue gas desulphurization (FGD) systems from coal-fired power plants: overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs* .
- CUEVAS, P. E. (2001. ). *CO<sub>2</sub> como factor que modifica el ph del agua del mar y sus efectos en cascarones de huevo* .

- Curiel Alegre, S. (2017). *Estudio del estado del arte de las tecnologías de desulfuración mediante inyección de absorbente seco. Evaluación del Retrofitting en una Central Termoeléctrica.* Universidad de Sevilla.
- De la Hoz Siegler, H. J. (2003). *Diseño de un módulo para el dimensionamiento hidráulico de torres empacadas.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- ELISA, P. (2000). *Análisis del desarrollo de los cultivos: medio, agua y especies.* (Vol. Tomo 1).
- EPA. (2002). *Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards.* U.S.
- Garcés Giraldo, L. F. (2004). La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local. *Revista Lasallista de Investigación.*, vol. 1(núm. 2), 67-72.
- GARCÍA, P. (2008). *Cultivo ecosostenible de algas marinas.*
- GÓMEZ, E. (2013). *Evaluación nutricional y propiedades biológicas de algas marinas comestibles. Estudios in vitro e 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 montañaíta, la entrada y la rinconada, provincia de santa elena".* Universidad Estatal Península de Santa Elena.
- HLÛTERS, M. R. (2014). Absorption of Sulphur Dioxide with Sodium Hydroxide Solution in Packed Columns. *Chemical Engineering and Technology.* , Vol.36(10) pp.201-209 .
- JIMÉNEZ, E. (2002). *Análisis del desarrollo de cultivos: medio, agua y especies.*
- Kohl, A. L. (1997). *Gas purification.* . Houston: 5th. Gulf.
- KUBLEN. (1999). *Aquatic plant growth response to high CO2 concentration.*
- 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.*

- Misari-Cuesta, M. &.-S. (2011). *Evaluación del efecto del tipo de relleno (anillo Rasching y montura Berl de cerámico) sobre el factor de reacción en la absorción química del dióxido de carbono puro con hidróxido de sodio en la columna de absorción del LOPU-FIQ-UNCP*. Huncayo: Universidad Nacional del Centro de Perú.
- Montenegro-Silva, I. M.-O. (2006). *Diseño y construcción de un prototipo de sistema para reducir la concentración de SO<sub>2</sub> de los gases de cola generados en el proceso de desulfuración del refinamiento de crudo en la refinería estatal Esmeralda*. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército.
- Nazaroff & Alvarez-Cohen, M. (2014). *Flue-gas desulfurization ("Scrubbers")*. Obtenido de <https://engineering.dartmouth.edu/~d30345d/courses/engs37/Scrubber>
- Norton Chemical Process Product, C. (2001). *Packed Towers Internals Guide*. Akron, OH, USA: PTP-2. Saint Gobain.
- OILGAE. (2006). *Aquatic plant growth response to very high CO<sub>2</sub> concentration*.
- OMS., O. M. (2005). Guías de la calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Resumen de la evaluación de riesgos. Actualización mundial.
- Peavy, H. R. (1985). *Environmental Engineering*. (1st Edition ed.). Halthorpe: McGraw-Hil.
- PEÑA, A. (2011). *Uso potencial de la macroalga verde ulva clathrata en el cultivo de camarón blanco litopenaeus vannamei*.
- Pérez Sánchez, A. P. (2019). *Diseño de una columna empacada y una torre de bandejas perforadas para la absorción de etanol. 1. Diseño de la columna empacada*. .
- Peters, M. T. (1991). *Plant design and economics for chemical engineers*. Editorial Advisory Board.
- PFAFFLIN, R. Z. (2010). *Encyclopedia of environmental science and engineering*.
- Picó, G. (2012). Control de la contaminación atmosférica. In Contaminación atmosférica. Editorial UNED.
- PLAZA, M. (2010). *Búsqueda de nuevos ingredientes funcionales naturales procedentes de algas*.

- POLLUTIONSYSTEMS. ( 2015). *Air Pollutions Control Systems*. Recuperado el 28 de enero de 2020, de Pollution Systems Industrial Air Solutions. : <https://www.pollutionsystems.com/wet-scrubbers>
- Pretorius, L. P. (2015). A perspective on South African Coal Fired Power Station Emissions. *Journal of Energy in Southern Africa*, 7-40.
- Rangel, F. (2011). *Absorción de gases: método de cálculo en contacto discontinuo*. Universidad Nacional del Callao.
- RIOS, J. (2016.). *Propuesta de diseño preliminar de una planta industrial de cultivo intensivo de macroalga (Ulva Lactuca) a partir del CO2 residual de la Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Rivera Letelier, J. G. (2016). *Diseño y evaluación de costos para la implementación de una torre didáctica de asperción, para desulfuración de gases de combustión*. Universidad técnica Federico Santa María.
- RODRIGUEZ, A. G. (2012). *Evaluación de sistema experimental para el cultivo intensivo de macroalgas marinas*. Cento Azúcar.
- Salazar Peralta, A. (2012). *Estudio y selección de material empaque estructurado: metálico, polimérico o cerámico, para operar eficientemente una coloumna de absorción de gases contaminantes provenientes de hornos tabiqueros*. Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Salud., O. M. (2005). *Guías de la calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Resumen de la evaluación de riesgos. Actualización mundial*.
- Strigle, R. (1994). *Packed Tower Design and Aplications: Random and Structured Packings*. (Second Edition ed. ed.). Houston: Gulg Publishing Co.
- TISSERAT. ( 2001). *Captura de CO2 en plantas acuáticas*.
- TREYBAL, R. E. (1977). *Operaciones con transferencia de masa*. MCGRAW-HILL.

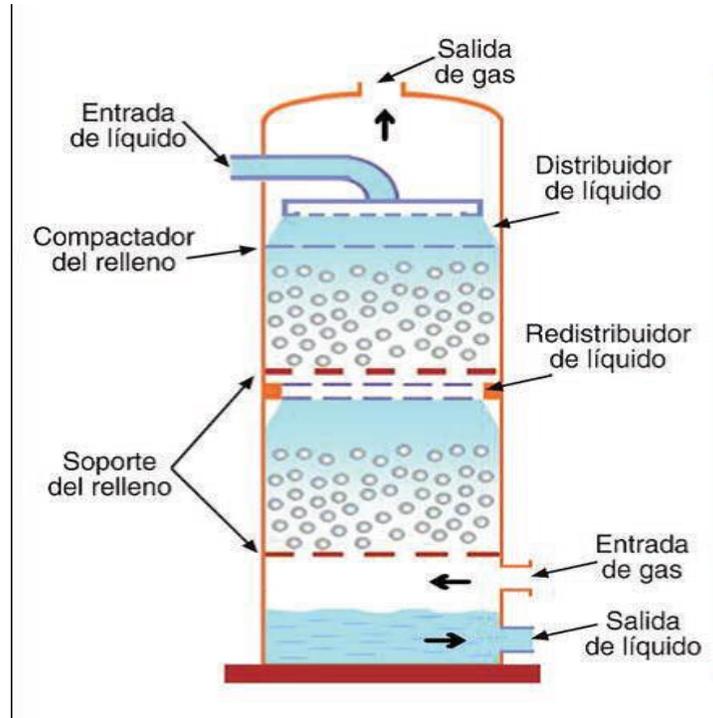
Treybal, R. E. (1999). Equipo para las operaciones gas - líquido. En *Operaciones de Tránsito de Masa*. (Segunda Edición ed., págs. pp. 212 -236). Universidad de Rhode Island: McGraw Hill.

Velasco Hurtado, C. (junio de 2005). Tecnologías de desulfuración de gases. *Revista Metalúrgica UTO*(26).

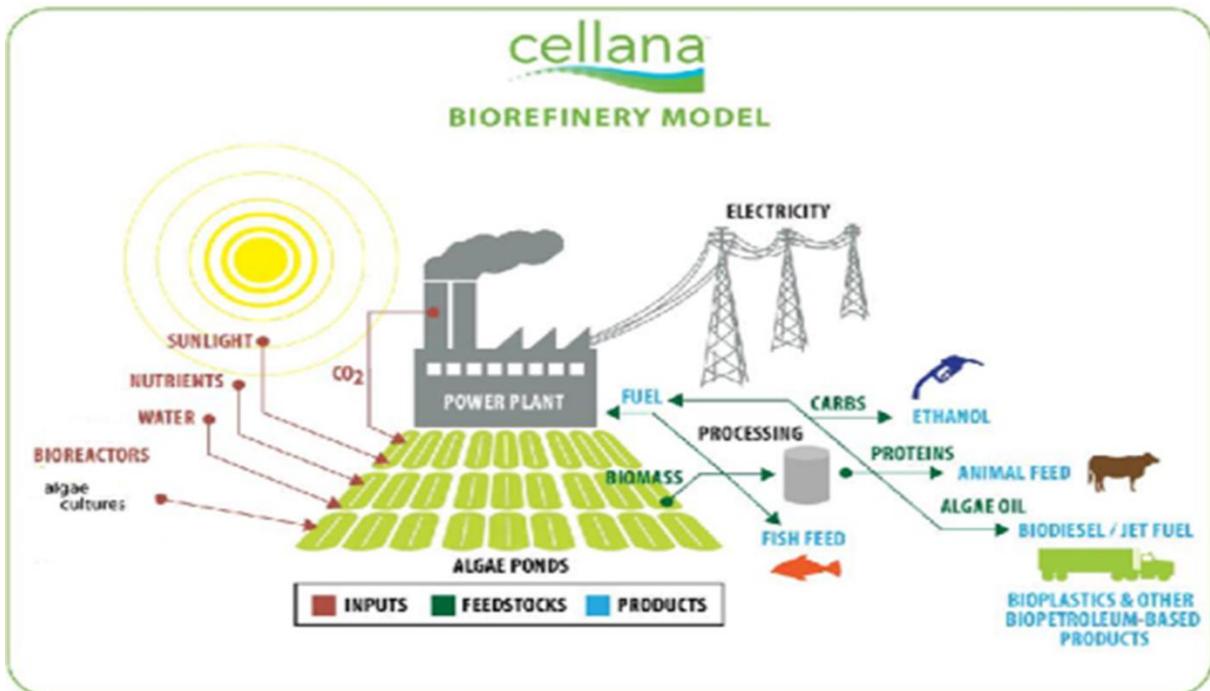
VELÁSQUEZ, M. ( 2012). *Una alternativa sostenible y de futuro para los cultivos marinos*.

## Anexos

### Anexo A. Esquema de una columna de absorción.



### Anexo B. Proceso de cultivo de macroalga "Ulva Lactuca".



Anexo C. Macroalga "Ulva Lactuca".



Anexo D. Anillos Rasching de cerámica.



## Anexo E. Selección del equipo de bombeo SIL 80X55.

SIL

### CONDICIONES Y CARACTERÍSTICAS

Motor P <sub>2</sub>		Caudal en litros por hora																Altura ábete rodete mm.	Roscas Imp. Asp.				
HP	Kw	2000	4000	7000	10000	14000	18000	22000	26000	30000	34000	38000	44000	50000	56000	62000	68000			74000	80000		
		Altura en metros																					
0,5	0,37	12	9	2																	6	G1"	
0,75	0,55	17	15	13	10	5,5																7	G1 1/2"
1	0,75	17	15,5	14,5	13	10	6															12	G1 1/2"
1,5	1,1	15,5	15	14	12,5	11	9	6														12	G2"
2	1,5	19	9	18	17	15	13	11,5	9	3,5												16	G2"
3	2,2			18	17,5	16,5	16	15	14	12,5	11,5	9,5	7	5								25	G3"
4	3				20,5	19	18	16,5	15	13,5	11	9	6	3								17	G3"
5,5	4				27,5	27	26,5	25	24	23	21	19,5	17	14	11	7						19	G3"
7,5	5,5				28,5	28	27	26	25,5	25	24	23	21,5	20,5	18,5	17	15	13	10,5			24	G3"
5,5	4		39,5	38	36,5	34	31,5	29	26	23	18,5	19										9,5	G3"
7,5	5,5			49,5	49	47	45,5	44	41,5	39	36	32	26	17								10,5	G3"
10	7,5				51,5	49	48	45,5	43	40,5	38	33,5	28,5	21,5								13	G3"
12,5	9,2				55	54	52	50,5	48,5	46,5	44	41,5	37	32	22							14	G3"
20	15					63	62	61	59,5	58	56,5	53,5	51	47	43	36,5						14	G3"
25	18,5						73,5	72,5	71,5	70	68,5	66,5	65	60,5	57,5	53	46,5					18	G3"
30	22							74	73,5	73	72,5	71,5	70	68	66	63,5	61	58				20	G3"

se suministran también con motor monofásico 230 V.

## Anexo F. Costo de tanque para almacenar agua.



Tanques de almacenamiento de agua rotomoldeado, tanque de agua de 5000 litros

10,00 US\$ - 100,00 US\$

#### Anexo G. Compresor de gases.



#### Anexo H. Balón de almacenamiento de gases.

