



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de estudios de Postgrado

Recuperación de CO₂ generado por la combustión de búnker C en las calderas de una fábrica de bebidas carbonatadas, para reducir las emisiones.

Ing. Leonel Adalberto Ortuño Valdivieso
Asesorado por Ms. Ing. José A. Rosal Ch.

Guatemala, noviembre de 2,014

Universidad de San Carlos de Guatemala



Facultad de Ingeniería

Recuperación de CO₂ generado por la combustión de búnker C en las calderas de una fábrica de bebidas carbonatadas, para reducir las emisiones.

Trabajo de graduación

Presentado a la Junta Directiva de la
Facultad de Ingeniería
por

Ing. Leonel Adalberto Ortuño Valdivieso
Asesorado por Ms. Ing. José A. Rosal Ch.

Al conferírsele el título de

Maestro en Energía y Ambiente

Guatemala, noviembre de 2,014

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería



Nómina de Junta Directiva

| | |
|------------|--------------------------------------|
| Decano | Msc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| Vocal I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| Vocal II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| Vocal III | Ing. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| Vocal IV | Br. Walter Rafael Véliz Muñoz |
| Vocal V | Br. Sergio Alejandro Donis Soto |
| Secretario | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

Tribunal que practicó el examen general privado

| | |
|-------------|--|
| Decano | Msc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| Examinadora | Dra. Mayra Virginia Castillo Montes |
| Examinador | Msc. Ing. Juan Carlos fuentes Montepeque |
| Examinador | Msc. Ing. Mario Roberto Hernández Morán |
| Secretario | Msc. Ing. Juan Carlos fuentes Montepeque |

Honorable Tribunal Examinador

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

Recuperación de CO₂ generado por la combustión de búnker C en las calderas de una fábrica de bebidas carbonatadas, para reducir las emisiones.

Tema que me fuera asignado por la dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 6 de mayo de 2,014

A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval. The signature is stylized and appears to read 'L. Ortuno Valdivieso'.

Ing. Leonel Adalberto Ortuno Valdivieso

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato
Teléfono 2418-9142

Ref. APT-2014-019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Tesis de la Maestría en Energía y Ambiente titulado: **“RECUPERACIÓN DE CO₂ GENERADO POR LA COMBUSTIÓN DE BUNKER C EN LAS CALDERAS DE UNA FÁBRICA DE BEBIDAS CARBONATADAS, PARA REDUCIR LAS EMISIONES”**, presentado por el Ingeniero Mecánico **Leonel Adalberto Ortuño Valdivieso**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, noviembre de 2014.

Universidad de San
Carlos
De Guatemala

APT-2014-019



Facultad de
Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

La Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **“RECUPERACIÓN DE CO₂ GENERADO POR LA COMBUSTIÓN DE BUNKER C EN LAS CALDERAS DE UNA FÁBRICA DE BEBIDAS CARBONATADAS, PARA REDUCIR LAS EMISIONES”** presentado por el Ingeniero Mecánico **Leonel Adalberto Ortuño Valdivieso** apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Noviembre de 2014.

Cc: archivo
/la

Universidad de San
Carlos
De Guatemala

APT-2014-019



Facultad de
Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

Como Coordinador de la Maestría en Energía y Ambiente y revisor del Trabajo de Tesis titulado **“RECUPERACIÓN DE CO₂ GENERADO POR LA COMBUSTIÓN DE BUNKER C EN LAS CALDERAS DE UNA FÁBRICA DE BEBIDAS CARBONATADAS, PARA REDUCIR LAS EMISIONES”**, presentado por el Ingeniero Mecánico **Leonel Adalberto Ortuño Valdivieso**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Una firma manuscrita en tinta negra, que parece ser la de Juan Carlos Fuentes Montepeque, escrita sobre el espacio reservado para la firma.



MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, Noviembre de 2014.

Cc: archivo
/la

Universidad de San
Carlos
De Guatemala

APT-2014-019



Facultad de
Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

Como Revisor de la Maestría en Energía y Ambiente del Trabajo de Tesis titulado **“RECUPERACIÓN DE CO₂ GENERADO POR LA COMBUSTIÓN DE BUNKER C EN LAS CALDERAS DE UNA FÁBRICA DE BEBIDAS CARBONATADAS, PARA REDUCIR LAS EMISIONES”**. Presentado por el Ingeniero Mecánico **Leonel Adalberto Ortuño Valdivieso**, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'R. Sandoval'.



MSc. Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
Revisor
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, Noviembre de 2014.

Cc: archivo
/la

Acto que dedico, a:

| | |
|-----------------------|---|
| Dios | Que guía mis pasos. |
| Guatemala | Patria bendita que me vio nacer. |
| Mi esposa | Anaité, por su apoyo a continuar con mis estudios. |
| Mis hijos | Fátima de las Mercedes y Leonel Ricardo, motivo de mi inspiración y mi orgullo. |
| Mi madre | Mirna Valdivieso, por su amor incondicional. |
| Mi tía | Amparo Santiago, mi agradecimiento por siempre. |
| A mis hermanos | Leonora, Leonardo y Lourdes, porque juntos somos capaces de mucho. |

Agradecimientos a:

La Universidad de San Carlos de Guatemala.

Por los conocimientos transmitidos

La Escuela de Estudios de Postgrado

Por su enfoque, visión, conocimientos y ayuda

La empresa objeto del presente estudio.

Por permitirme usar sus instalaciones, equipo, información y el apoyo brindado para el desarrollo del presente trabajo.

Mi asesor

Ms. Ing. José A. Rosal Ch., por su valiosa y oportuna intervención, así como la orientación y apoyo brindado.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----------|
| Índice de ilustraciones. | I |
| Índice de tablas | III |
| Lista de símbolos | V |
| Glosario | VII |
| Resumen | XI |
| Objetivos | XIII |
| Resumen marco metodológico | XV |
| Introducción | XIX |
| Antecedentes. | XXIII |
| Descripción del problema. | XXIX |
| Justificación | XXXI |
| Alcances y límites. | XXXV |
| 1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL. | 1 |
| 1.1. Propiedades del dióxido de carbono, CO₂ | 2 |
| 1.1.1. Problemas ambientales. | 4 |
| 1.2. Combustibles fósiles | 6 |

| | |
|--|----|
| 1.2.1. Fuel Oil No. 6 (Bunker C) | 7 |
| 1.2.2. Especificaciones para Guatemala | 9 |
| 1.3. Calderas | 10 |
| 1.3.1. Calderas pirotubulares | 10 |
| 1.3.2. Calderas de estudio | 12 |
| 1.3.3. Descripción del proceso de gases de combustión actual. . . | 12 |
| 1.4. Sistemas de captura de CO ₂ | 14 |
| 1.4.1. Sistemas de poscombustión | 16 |
| 1.4.1.1. Absorción química | 16 |
| 1.4.1.2. Procesos de absorción química en investigación. . . | 20 |
| 1.4.2. Sistemas de precombustión | 22 |
| 1.4.3. Sistemas de oxidación | 23 |
| 1.5. Proceso de licuefacción de CO ₂ | 23 |
| 2. MÉTODOS Y TÉCNICAS | 25 |
| 2.1. Metodología | 25 |
| 2.1.1. Tipo de estudio | 25 |
| 2.1.2. Variables | 25 |
| 2.1.3. Muestreo | 25 |
| 2.1.3.2. Descripción del método de muestreo | 26 |
| 2.2. Técnicas | 27 |
| 2.2.1. Descripción del analizador de gases de combustión. | 28 |
| 2.2.2. Análisis de gases de chimenea | 29 |
| 2.2.3. Cálculo de CO ₂ disponible en los gases de chimenea. | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 3. RESULTADOS | 33 |
| 3.1. Datos de gases de chimenea. | 33 |
| 3.2. Estimación de dióxido de carbono disponible. | 33 |
| 3.3. Dimensionamiento del equipo de captura | 36 |
| 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS. | 37 |
| 4.1. Selección de tecnología de captura | 38 |
| 4.2. Descripción del proceso de captura y absorción de CO₂ | 40 |
| 4.3. Descripción del equipo de captura | 44 |
| 4.4. Beneficios de la implementación del equipo de captura. | 47 |
| CONCLUSIONES. | 49 |
| RECOMENDACIONES. | 51 |
| BIBLIOGRAFÍA | 53 |
| ANEXOS. | 55 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Figura No. 1. Caldera pirotubular de horno interno. | 11 |
| Figura No. 2. Lavadora de gases de combustión | 13 |
| Figura No. 3. Sistemas de captura de CO ₂ | 15 |
| Figura No. 4. Proceso general de absorción química de CO ₂ | 17 |
| Figura No. 5. Proceso de licuefacción de CO ₂ | 24 |
| Figura No. 6. Toma de muestra de gases de combustión. | 27 |
| Figura No. 7. Pantalla del analizador de gases mostrando resultados | 28 |
| Figura No. 8. Analizador de gases Testo 327 | 29 |
| Figura No. 9. Derivación de gases de combustión a torre de absorción. | 40 |
| Figura No. 10. Ciclo de captura de CO ₂ | 42 |
| Figura No. 11. Destilación y filtración de CO ₂ | 43 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla No. 1. Propiedades físico – químicas del CO ₂ | 4 |
| Tabla No. 2. Especificaciones técnicas guatemaltecas para combustible búnker C | 9 |
| Tabla No. 3. Porcentaje de remoción de compuestos en lavador de gases . . | 14 |
| Tabla No. 4. Resumen de promedios de componentes de gases de combustión de las cuatro calderas. | 33 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|--|
| CFC's | Cloro fluoro carbonos |
| ρ | Densidad |
| SO ₂ | Dióxido de azufre |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| HX | Intercambiador de calor |
| kg | Kilogramo masa |
| CO | Monóxido de carbono |
| NO _x | Óxidos nitrosos |
| ppm | Partes por millón (1/1,000,000) |
| % | Porcentaje (1/100) |
| Atm | Presión en atmósferas |
| K | Temperatura en grados Kelvin |
| °F | Temperatura en grados Fahrenheit |
| psig | Unidad de presión manométrica. Libras por pulgada cuadrada |
| barg | Unidad de presión manométrica, equivalente a una atmósfera |

GLOSARIO

Búnker: También conocido como Fuel Oil o aceite combustible. Es el combustible más pesado que se puede destilar y el residuo del proceso de destilación del petróleo.

Caldera: Recipiente a presión que sirve para generar vapor mediante la aplicación de calor.

Calentamiento global: Aumento de la temperatura media del planeta.

Cambio climático: Modificación del clima respecto a los registros históricos, que puede ser a escala regional o global.

Chimenea: Dispositivo utilizado para la evacuación de gases calientes de humos hacia la atmósfera.

Combustible fósil: Depósitos geológicos de materia orgánica combustible formados por la descomposición de plantas y animales enterrados y sometidos a condiciones de presión y temperatura. En esta categoría se clasifican el carbón mineral, el gas natural y el petróleo.

Combustión: Reacción química en la que cualquier material reacciona con oxígeno y se oxida, liberando calor y luz.

Corrosivo: Sustancia que tiene la capacidad de destruir irreversiblemente otra sustancia o superficie cuando entran en contacto.

Dióxido de carbono: Gas incoloro e inodoro, ligeramente ácido y no flamable, formado por la oxidación del carbono. Una molécula de carbono se une con dos de oxígeno. Su origen más conocido es la reacción química que se produce por la quema de combustibles.

Efecto invernadero: Fenómeno natural por el cual determinados gases fijados

en la atmósfera terrestre, retienen parte de la energía que proviene del sol y no la dejan salir al espacio exterior, calentando el planeta.

Gases de efecto invernadero: Gases que se encuentran en la atmósfera cuya concentración es baja, pero con la importancia fundamental de controlar la temperatura del planeta. Los principales son: vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, ozono y clorofluorocarbonos. Este último es el único gas no natural con características de gas de efecto invernadero.

Hidrocarburo: Compuestos orgánicos formados por átomos de hidrógeno y carbono.

Hollín: Partículas sólidas menores a 5 micras, principalmente producidas por compuestos de carbono resultante de la combustión incompleta de un material que se liberan al ambiente junto con los gases de combustión.

Huella de carbono: Calcula todas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas directa o indirectamente por personas, organizaciones, productos, eventos o Estados.

Intercambiador de calor: Dispositivo utilizado para transferir energía en forma de calor de un fluido (líquido o gaseoso) a otro, sin que estos entren en contacto entre sí.

Ley de los gases ideales: Un gas hipotético formado por partículas puntuales, sin atracción ni repulsión entre ellas y cuyos choques son perfectamente elásticos. La energía cinética es directamente proporcional a la temperatura en un gas ideal.

MEA (monoetilamina): Compuesto químico orgánico que es tanto amina como alcohol, en la que los radicales libres de la amina hacen que el dióxido de carbono se combine con ella dando un compuesto que necesita muy poca energía para descomponerse y liberar el CO₂.

OMS: Organización Mundial de la Salud. Es la autoridad directiva y coordinadora de la acción sanitaria en el sistema de las Naciones Unidas, responsable de desempeñar funciones de liderazgo en los asuntos sanitarios mundiales.

Petróleo: Mezcla homogénea de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua. Se produce en el interior de la tierra por transformación de materia orgánica sometida a condiciones de presión y temperatura en el interior del planeta.

Revolución Industrial: Proceso de transformación económico, social y tecnológico que inició a mediados del siglo XVIII en Gran Bretaña, extendiéndose a Europa occidental y Estados Unidos y que duró hasta mediados del siglo XIX, que vio el cambio de una economía rural basada en agricultura y comercio a economía de carácter urbano, industrializado y mecanizado.

RESUMEN

Posterior a la Revolución Industrial la humanidad basó su desarrollo consumiendo combustibles fósiles, pero con un costo ambiental inherente, la emisión de dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero que provoca alteraciones climáticas importantes.

La industria consume energía a base de combustibles fósiles y es la principal responsable de la emisión de dicho gas.

Existe la tecnología que permite capturar el dióxido de carbono producido por quemar combustibles evitando así su emisión al ambiente y preparándolo para que se le pueda dar otros usos en la industria. Ciertos procesos manufactureros utilizan el dióxido de carbono, como en el caso del proceso de bebidas carbonatadas, que es el mejor ejemplo conocido del uso de este gas, el cual podría utilizar el dióxido de carbono generado en sus calderas.

El estudio se realizó en las calderas de una empresa productora de bebidas carbonatadas mediante el análisis de los gases de chimenea, para lo cual se realizaron mediciones de concentración de compuestos en los gases de combustión de las cuatro calderas existentes, haciendo uso del principio de los gases ideales de química. En el presente trabajo de investigación se determinó el potencial de captura y recuperación de dióxido de carbono proveniente de los gases de combustión, identificando el tipo de tecnología de captura que mejor se adapta a las condiciones de operación existentes y, por lo tanto, reduce sus emisiones al ambiente.

Se determinó que, uniendo los flujos de gases de chimenea y reorientándolos a un equipo de captura, es posible recuperar anualmente cerca de 5,400 toneladas métricas de dióxido de carbono, que se pueden reusar para carbonatar bebidas, evitando que se liberen al ambiente.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar si es posible la captura del CO₂ generado en la combustión de búnker en las calderas, para procesarlo en la planta purificadora existente en la empresa objeto del estudio, para su posterior utilización, reduciendo las emisiones al ambiente.

Objetivos específicos

1. Estimar el volumen de CO₂ que se produce de la combustión de búnker en las calderas.
2. Determinar si técnicamente es posible la captura de CO₂ para evitar su emisión al ambiente
3. Determinar el tipo de tecnología de captura de CO₂ que mejor se adapta a los requerimientos existentes.
4. Dimensionar el equipo necesario para la captura de CO₂

Necesidades a cubrir y esquema de solución

Entre las necesidades a cubrir están:

1. Disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera.
2. Reducir la dependencia de compra de CO₂ a proveedores externos.
3. Determinar la tecnología adecuada para realizar la captura de CO₂.

RESUMEN MARCO METODOLÓGICO

Para la realización del presente trabajo se determinó una metodología de tipo mixta, que se dividió en dos etapas. La primera etapa fue de enfoque cualitativo ya que se recogieron datos desde varios puntos de vista por medio de investigación bibliográfica; la segunda etapa fue de tipo cuantitativo, en donde se tomaron lecturas de la calidad de gases de combustión emitidos al ambiente y se realizaron los cálculos necesarios para estimar el volumen de dióxido de carbono producido.

La investigación se dividió en 4 fases:

Fase 1

Se realizó la revisión documental disponible sobre las distintas tecnologías existentes para la captura de dióxido de carbono, por medio de procesos de recolección de información directamente de las fuentes bibliográficas e información vía WEB (internet) relacionada con el tema.

Fase 2

Se tomaron datos en campo utilizando el instrumento de análisis de gases de combustión para determinar la concentración de los distintos componentes de los gases de combustión, directamente de cada una de las cuatro chimeneas de las calderas.

Para el cálculo de volumen de CO₂ disponible para captura, se realizaron diez mediciones de concentración de gases para cada caldera, los cuales se tabularon y promediaron, obteniendo un promedio general de los gases liberados al ambiente.

Fase 3

Con los datos de combustión obtenidos, se realizó el análisis de concentración de CO₂ y con los datos de volumen de gases de cada

chimenea, utilizando la ley de los gases ideales y cálculo matemático, se estimó el volumen de dióxido de carbono disponible para captura y recuperación.

Fase 4

Con base a la información técnica obtenida de los distintos procesos de captura y extracción de CO₂ y con el dato calculado de volumen de CO₂ disponible en las chimeneas de las calderas, se determinó el tipo de tecnología que mejor se adapta al proceso y se definió la capacidad del equipo necesario para la captura.

Se utilizó sistemas de cómputo para procesamiento de datos, elaboración de tablas y diagramas para facilitar la interpretación.

Técnicas de análisis de información

Para la toma de lecturas de concentración de los gases de combustión, se llevó el analizador de gases a cada una de las chimeneas y se tomaron las lecturas directamente del instrumento y anotando los datos en una bitácora de campo, para luego pasar dicha información a una hoja de cómputo Excel para el procesamiento de datos.

Debido a que se debe dimensionar el equipo de captura para las condiciones de máxima producción de CO₂ de tres de las cuatro calderas (una caldera siempre está en mantenimiento), se utilizó el promedio de las tres con mayor concentración de éste gas a la máxima capacidad de la caldera.

En el presente estudio se aplicaron técnicas estadísticas, que permitieron analizar los diferentes datos recopilados.

Aplicando estadística inferencial, con una desviación estándar menor a uno, permitió aplicar como procedimiento estadístico el promedio, cuya medida de tendencia central permitió identificar los valores más cercanos al volumen real

de concentración de dióxido de carbono, a fin de garantizar la estimación de volumen total para dimensionar los equipos necesarios para la captura y recuperación.

Con el dato de los tres promedios estadísticos, se promediaron para obtener el valor de concentración de CO₂ disponible en los gases de chimenea, con lo cual (haciendo uso de la ley de los gases ideales) se pudo estimar el tonelaje de dióxido de carbono disponible para captura y se determinó el dimensionamiento del equipo necesario para la captura.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realizó siguiendo las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, dentro de los requerimientos de la Gestión Ambiental, y específicamente dentro del proceso de reducción de emisiones de dióxido de carbono, producido por la combustión de combustibles fósiles, a la atmósfera mediante la captura y procesamiento de este gas.

Los efectos del cambio climático representan la mayor amenaza para la humanidad, con catastróficas consecuencias socioeconómicas y que, sin duda alguna, todos los seres vivos sobre éste planeta se verán afectados. (Stern, 2006)

El comportamiento del clima nunca ha sido estático ni estable, históricamente se ha comportado de forma dinámica y en casos extremos, cambiando de condiciones cálidas y frío extremo. El problema ambiental no son sus cambios, sino que lo acelerado y drásticos que se han vuelto estos cambios durante los últimos años y cuya tendencia es a incrementarse y ser aún más extremos. (Stern, 2006)

Muchas y muy variadas investigaciones se han desarrollado para identificar las causas del cambio tan dramático de las condiciones climáticas, y todas encuentran que existe una estrecha relación entre las variaciones climáticas y el calentamiento global. El calentamiento global es consecuencia de la liberación excesiva de gases de efecto invernadero al ambiente, ya que permite el paso de la radiación solar pero absorbe la radiación infrarroja emitida por la Tierra.

El libro electrónico, *Cambio climático y efecto invernadero*, (Universidad de Navarra) indica que:

“Los gases con características de provocar el efecto invernadero son varios, incluyendo el dióxido de carbono, que ha aumentado en 31% de su concentración normal, consecuencia de la actividad humana de las sociedades tanto industrializadas como en desarrollo”. (Tema No. 10).

El dióxido de carbono (CO₂) se origina de varias formas, una de las más conocidas es como sub producto de la quema de combustibles fósiles consecuencia de la oxidación de los átomos de carbono.

La empresa de bebidas carbonatadas objeto del estudio utiliza cuatro calderas del tipo pirotubulares de 1000 BHP que queman combustible tipo búnker C (Fuel Oil No.6) para generar vapor saturado, el cual le sirve para sus distintos procesos dónde se requiere calor y, como consecuencia de quemar este combustible, se libera dióxido de carbono al ambiente.

La investigación consiste en determinar cuánto y cómo se puede capturar y recuperar el CO₂ producido en las calderas como consecuencia de la quema de bunker para producir vapor, reduciendo las emisiones al ambiente

El trabajo de investigación se desarrolla en cuatro capítulos, en los cuales se describen desde los conceptos básicos que permitan al lector introducirse a los conceptos básicos de los procesos involucrados y que se adentre en el contexto de los objetivos de la investigación, para luego describir la fase experimental, la descripción de los equipos de captura y recuperación de CO₂ para finalmente presentar los resultados de la investigación.

En el primer capítulo se describen conceptos básicos relacionados con las propiedades y efectos, producción, captura y recuperación del CO₂, identificando cómo se produce y los distintos métodos o tecnologías para su captura y recuperación.

En el capítulo dos se analizan los gases de combustión de las calderas de la

empresa objeto de estudio, describiendo la metodología utilizada y las técnicas de muestreo y cálculo del volumen de CO₂ que se produce y que se está liberando al ambiente.

En el capítulo tres se realizan los cálculos y se determina la tecnología que mejor se adapta a las condiciones existentes y se dimensiona el equipo necesario para la captura, describiendo el proceso detalladamente, para finalmente, en el capítulo cuatro, discutir los resultados obtenidos de la investigación.

ANTECEDENTES

El planeta depende del equilibrio entre la concentración de gases en la atmósfera y la temperatura del planeta, gracias al efecto invernadero que permite retener parte de la energía calorífica que recibe del sol y dejando escapar al espacio el resto de la energía recibida, manteniendo una temperatura de confort en promedio de 33°C sobre la temperatura que habría si no hubiera retención de calor. El desequilibrio se produce al aumentar de forma desmedida la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera que provoca la retención en exceso del calor solar, aumentando la temperatura promedio del planeta.

En el artículo *Dióxido de carbono* de la guía del consumidor de la Fundación Eroski, publicada el 4 de Noviembre de 2005, se indica que:

“El análisis de gases retenidos en muestras de hielo de la Antártida y Groenlandia ha permitido conocer la concentración de CO₂ atmosférico y de otros gases de efecto invernadero de los últimos 160.000 años. Con los datos obtenidos, los científicos han detectado que los niveles actuales de CO₂ en la atmósfera son los mayores desde que se tiene constancia, produciéndose un aumento sustancial y acelerado durante los últimos 160 años, es decir, desde el inicio de la Revolución Industrial. Además, los científicos han estudiado que el CO₂ se escapa del suelo cada vez más rápido, lo que acelera aún más el calentamiento global. El incremento de las emisiones de dióxido de carbono provoca alrededor del 50-60% del calentamiento global. La combustión de combustibles fósiles para la generación de energía provoca alrededor del 70-75% de las emisiones de CO₂”.

Lo anterior evidencia que los niveles de concentración de CO₂ se han incrementado dramáticamente desde la época de la revolución industrial a la

fecha, y principalmente se debe al uso intensivo de combustibles fósiles para la industrialización.

En su artículo sobre la necesidad de controlar las emisiones de CO₂, (Sánchez Alarcón, Pujol, & Estrany Coda, 2006) los autores indican:

“Además del CO₂, existen otros gases en la atmósfera con efecto invernadero, como el metano, con una acción 25 veces superior al CO₂, y los CFC's (clorofluorocarburos o freones de refrigeración), 15,000 veces más activos que el CO₂. No obstante, como la cantidad de CO₂ es mucho mayor que la del resto de gases, su contribución real al efecto invernadero es del 76% respecto al total de gases. La industria es responsable, directa o indirectamente, del 55-80% de la producción de CO₂, entre otros gases, y una fracción apreciable de las emisiones ocurre como resultado de la actividad industrial relacionada con la combustión de combustibles fósiles”. (Pg. 35).

El CO₂ existe en un ciclo natural, donde las plantas por medio de la fotosíntesis está capturando carbono y liberando oxígeno al ambiente. La atmósfera tiene 750 mil millones de toneladas de CO₂, de las cuales 90 mil millones son intercambiados con el mar y 100 mil millones con la biósfera terrestre. Las restantes 560 mil toneladas de CO₂, junto con otros gases de GEI, permanecen en la atmósfera como potencia de calentamiento por su propiedad absorbente de calor. Lo que se indica en el párrafo anterior, es que existen otros gases con potencial mucho mayor de absorción de calor, pero en mucho menor cantidad que el CO₂, por lo que se considera que su contribución al efecto invernadero es menor.

Según la OMS, en su nota descriptiva No. 266 de octubre del 2013, indica que en los últimos cien años, el planeta ha sufrido un incremento promedio en su temperatura de 0.75°C, y que durante los últimos 25 años este proceso de

calentamiento se ha acelerado, lo que implica un incremento consistente de 0.18°C por cada diez años.

En el documento *Síntesis de la Legislación de la UE, Aplicación del Protocolo de Kioto* de la Unión Europea se indica que:

“Al momento de la firma del Protocolo de Kioto, la Comunidad Europea se comprometió a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero causantes del calentamiento del planeta en un 8% para el 2008-2012. Uno de los objetivos del Protocolo de Kioto es la adopción de objetivos jurídicamente vinculantes relacionados con la reducción de las emisiones de 6 gases de efecto invernadero para 2008-2012: el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), el hidrofluorocarbono (HFC), el hidrocarburo perfluorado (PFC), y el hexafluoruro de azufre (SF₆)”.

La Comunidad Europea comprendió la urgente necesidad de controlar las emisiones de GEI, por lo que realizan acuerdos en la que los países industrializados, firmantes del tratado, se fijan compromisos cuantificados de reducción de emisiones, fijándose derechos de emisiones máximas, de las cuales no deben excederse.

Guatemala firmó el Protocolo de Kioto en el año 1998 y lo ratificó en octubre de 1999, mediante el Decreto No. 23-99 del Congreso de la República. Sin embargo, el país no cuenta con una legislación específica sobre las emisiones de carbono al ambiente, por lo que no están definidas a nivel nacional las concentraciones límites sobre las cuales restringen las emisiones al ambiente en general. En este sentido, el INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología), institución encargada del monitoreo de la calidad de aire en Guatemala, indica que mientras no se cuente con regulaciones nacionales en esta materia, el Sistema de Calidad del Aire

utilizará como referencia los Límites de Calidad del Aire establecidos en la legislación de EEUU a través de la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés), los cuales se listan en Anexo 5, sin embargo estas son solo para la medición y control, no hay acciones preventivas ni correctivas relacionadas y no consideran el CO₂ dentro de sus parámetros.

El dióxido de carbono ha sido incluido en la lista de sustancias peligrosas para la salud, por lo que la OSHA (Administración de Salud y Seguridad en el Trabajo, por sus siglas en inglés), lo tiene reglamentado y fija los valores límite de exposición permitido en el aire (PEL) en 5,000 ppm (0.5 % volumen / volumen) como promedio durante una jornada laboral de 8 horas, por lo que resulta importante controlar las emisiones de dicho gas, especialmente en las zonas cercanas a las fuentes.

En su tesis *Diseño y montaje de una instalación de laboratorio para la caracterización y desarrollo de absorbentes de CO₂ basados en aminas*, (López Fuentes, s.f.), capítulo 3: Captura de CO₂ en postcombustión: absorción, el autor indica que:

“El dióxido de carbono generado en procesos de combustión puede ser capturado y separado, tomando el gas en las chimeneas a presión atmosférica y presión mínima, mediante la utilización de equipos y procesos de absorción que capturan el CO₂ y lo procesan para que adquiera las condiciones necesarias para poder entregarlo a la planta purificadora”. (Pg. 48).

Esta información, obtenida de distintos autores, permite visualizar que el CO₂ es un gas que naturalmente existe en la atmósfera pero que las emisiones excesivas han provocado la saturación de éste gas en el ambiente, creando problemas de calentamiento y alteración del comportamiento del clima terrestre. También se menciona la urgente necesidad de controlar las emisiones

mediante la firma del Protocolo de Kioto, en el que todos los países industrializados deben reducir sus emisiones y ayudar a los países emergentes a controlar los suyos. De lo anterior se desprende que países europeos ya han avanzado en el control y aplicación de tecnologías para la reducción de emisiones y captura de dióxido de carbono y es posible aplicar esta tecnología en países emergentes, como el caso de Guatemala.

Existen proyectos implementados de recuperación del dióxido de carbono extraído de gases de combustión de plantas de cogeneración eléctrica a base de combustibles fósiles principalmente en países desarrollados tecnológicamente y especialmente en países de Europa, gracias al impulso que les ha dado los gobiernos locales, firmantes del tratado de Kioto, por ejemplo España y Francia, en los que el dióxido de carbono es recuperado y posteriormente comercializado.

En España, la empresa Carboneco, del grupo generador Neoelectra (proveedor independiente de energías renovables y eficientes que gestiona las inversiones de ArcLight Capital Partners en proyectos de cogeneración), se dedica a la recuperación del gas de distintas plantas generadoras que luego de procesarlo y purificarlo, lo comercializa en Portugal, Marruecos, Mauritania, Cabo Verde, Argelia y Gambia. En Pennsylvania, EEUU, existe la planta de generación eléctrica a base de quema de gas natural, RTI International, que recupera el dióxido de carbono proveniente de la combustión y de igual forma lo comercializa en estado líquido. El Departamento de Energía y Cambio Climático en el Reino Unido junto con el Centro Administrativo de la Agenda 21 de China (ACCA21) crearon un consorcio “Near Zero Emissions Coal” (Cerca de Cero Emisiones de Carbono) conformada por 28 miembros de ambos países con el fin de generar conocimiento e instalaciones para crear tecnología y casos de estudio para la captura del dióxido de carbono proveniente de la combustión de combustibles fósiles, lo que evidencia una fuerte tendencia por

la producción en un contexto de bajas emisiones y un esfuerzo por crear procesos amigables con el ambiente.

No se ha localizado evidencia documentada de que a la fecha, en Guatemala, existan proyectos implementados de recuperación de CO₂ proveniente de la quema de combustibles fósiles, por lo que es un campo aún no explorado en la región.

Para el caso de la empresa objeto del presente estudio, el CO₂ que se recupera, además del beneficio de no emitirlo al ambiente, proporciona el beneficio de que puede ser utilizado en sus procesos de carbonatación de bebidas una vez que sea purificado y vuelto a su estado líquido, con el consecuente resultado de reducir la necesidad de comprar este gas a terceros, mejorando la autonomía de suministro y reduciendo los costos de producción por concepto de carbonatación.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En su artículo sobre la necesidad de controlar las emisiones de CO₂, (Sánchez Alarcón, Pujol, & Estrany Coda, 2006) los autores hacen el siguiente comentario:

“El calentamiento global del planeta como consecuencia del aumento de la concentración del dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera, es posiblemente la cuestión ambiental más importante que enfrenta la humanidad”. (Pg. 35).

La quema de combustibles fósiles es la principal causante del aumento en la concentración de CO₂ al ambiente, lo que ha provocado importantes cambios en el comportamiento climático con consecuencias catastróficas para la humanidad.

El CO₂ es un conocido gas de efecto invernadero, que si se logra capturar antes de su liberación al ambiente, puede ser utilizado por la industria en distintos procesos que resultan amigables con el ambiente.

Se estima que las calderas de empresa objeto del estudio, liberan al ambiente un aproximado de 5,400 toneladas métricas anuales de CO₂ producto de la combustión de búnker C que al liberarlo al ambiente produce la emisión de gases de efecto invernadero, pero que si se captura de las chimeneas y se recupera, puede ser procesado y purificado para que la empresa reduzca su dependencia de compra de éste gas.

La empresa objeto del estudio utiliza CO₂ para sus procesos de carbonatación de bebidas, el cual proviene de dos fuentes distintas: 1.- Recuperación de procesos de fermentación y por medio de equipos existentes el CO₂ es sometido a lavado, secado, desodorizado, aumento de presión, purificado, licuado y finalmente almacenado en tanques de alta presión y 2.- comprarlo a

proveedores externos que lo entregan en estado líquido a alta presión y almacenado en los mismos tanques de alta presión del caso anterior.

Que la empresa pueda recuperar el CO₂ que actualmente se pierde liberándolo al ambiente, le supone un importante ahorro en la factura por la compra de este gas a proveedores externos, así como una mejor autonomía de suministro del gas al reducir la necesidad de comprarle el gas a proveedores externos.

Preguntas

¿Se puede capturar el CO₂ producido en la reacción química de la combustión de combustibles fósiles en calderas, para no emitirlo al ambiente?

Para encontrar una solución fiable a éste cuestionamiento, se debe resolver antes las siguientes interrogantes:

¿Cuál es la composición de los gases de combustión que salen por las chimeneas de las calderas y que son emitidos a la atmósfera?

¿Cuánto CO₂ se puede recuperar de los gases de combustión que salen por las chimeneas de las calderas?

¿Qué tipo de tecnología será necesario utilizar para la captura y recuperación del dióxido de carbono?

Para delimitar el problema, se tomará como unidad de análisis las calderas de una empresa manufacturera, productora de bebidas carbonatadas ubicada en la zona 2 de la Ciudad Capital de Guatemala.

La empresa objeto del estudio cuenta con una planta de recuperación y purificación de CO₂, sub producto de fermentación. El análisis de captura de CO₂ producido por la combustión en las calderas fue desde los gases de chimenea hasta el punto de ingreso a la planta purificadora de CO₂ existente.

JUSTIFICACIÓN

La generación de energía por medio de los métodos tradicionales de quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) implica inevitablemente la producción y liberación de dióxido de carbono al ambiente, lo que incrementa la concentración de dicho gas de efecto invernadero en la atmósfera. Actualmente, la concentración de CO₂ en la atmósfera es la más alta de lo que ha sido en cualquier momento durante los últimos 600,000 años, alcanzado valores de 379 partes por millón. Distintos estudios en climatología coinciden en que la principal causa del incremento promedio de la temperatura del planeta se debe al aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera. (López Fuentes, s.f.)

Utilizar otras fuentes de generación de energía que no produzcan dióxido de carbono como hidroeléctrica, eólica, solar, nuclear, geotérmica, biomasa, puede ser una forma de reducir la emisión de dicho gas producido por la generación de energía a base de combustibles fósiles, pero sustituir el método tradicional por estas tecnologías representa un gran reto, ya que cada una de estas tiene sus propias limitaciones y no será fácil migrar de la generación con combustibles fósiles a generación con fuentes alternativas.

Ya que no es factible, en el corto plazo, independizarse de los combustibles fósiles, ¿es posible capturar el dióxido de carbono para no liberarlo al ambiente y darle otro uso menos dañino en otro lado? Sí, capturar el dióxido de carbono es posible y el proceso se llama captura y almacenamiento de CO₂. Actualmente esta actividad se realiza en una pequeña escala y tiene el potencial de marcar una diferencia importante en la cantidad de CO₂ que se libera a la atmósfera. Tal como el nombre lo indica, este proceso consiste de dos etapas; el primer desafío consiste en capturar el CO₂ en lugar de liberarlo al ambiente y luego debe ser almacenado de para que se le pueda dar un uso

más amigable con el ambiente. (Fundación para estudios sobre la energía, 2008)

La OMS, en su nota descriptiva No. 313 de marzo del 2014, recomienda que la industria utilice tecnologías limpias que reduzcan las emisiones de las chimeneas al ambiente que permitan reducir la contaminación del aire.

Uno de los objetivos de la Maestría en Energía y Ambiente de la Universidad de San Carlos de Guatemala, es que el profesional presente, entre otras, soluciones a la problemática ambiental. Dentro de las líneas de investigación de la maestría, se encuentra el Tratamiento y Estrategias en la Gestión de Residuos, que corresponde al área de Gestión Ambiental, y el CO₂ producido por la combustión en las calderas, es un residuo que actualmente se libera al ambiente, contribuyendo al incremento en la concentración de gases de efecto invernadero. Realizar estudios con la intención de eliminar la emisión de CO₂ desde las fuentes, contribuye al cumplimiento del objetivo de la maestría ya mencionado.

La empresa objeto del estudio utiliza el gas carbónico para el proceso de carbonatación de bebidas, para lo cual se utilizan dos fuentes de suministro: la primera es la recuperación del CO₂ que es subproducto de fermentación y la segunda fuente es la compra de éste gas a proveedores externos. Se ha identificado una potencial fuente de CO₂ proveniente de los gases de combustión de las calderas que puede ser recuperado y procesado para que los equipos ya existentes lo purifiquen, licúen y almacenen, reduciendo la necesidad de compra de este gas y por lo tanto un beneficio económico a favor de la empresa.

En la presente investigación, se analiza la factibilidad técnica de instalar un equipo de captura y recuperación de CO₂, así como explicar el proceso de extracción de los gases de combustión hasta llevarlo a la planta de purificación

existente.

Los resultados que se esperan de la implementación del presente proyecto son, entre otros:

- Reducción de las emisiones de dióxido de carbono al ambiente producto de la quema de búnker en las calderas, reduciendo el impacto y deterioro del ambiente.
- Garantizar la correcta combustión en las calderas, lo que optimiza la eficiencia de la quema del combustible, reduciendo el monóxido de carbono y aumentando la producción de CO₂.
- Autonomía total de suministro de CO₂ de la empresa para suplir su propia demanda.
- Referente de innovación para otras empresas de la industria guatemalteca para realizar proyectos de captura y recuperación de dióxido de carbono.

ALCANCES Y LÍMITES

El trabajo de graduación tiene un alcance investigativo descriptivo, en el cual se busca especificar los componentes principales e importantes en el proyecto de estudio y analizar sus características cuantitativamente, por lo cual se puede concluir que es de tipo mixto, ya que el método de investigación se divide en dos etapas, la primera etapa es de enfoque cualitativo ya que se recogieron datos desde varios puntos de vista por medio de investigación bibliográfica. La segunda etapa es de tipo cuantitativo, donde se tomaron lecturas de la calidad de gases de combustión emitidos al ambiente.

Se analizaron los gases de combustión para determinar la cantidad de dióxido de carbono disponible y la concentración de los otros gases presentes, con el objetivo de dimensionar el equipo y los componentes necesarios para garantizar la correcta captura y extracción.

Se describe el proceso para poder identificar, seguir y comprender cómo funciona la captura y recuperación del dióxido de carbono.

El estudio es hasta el punto de la evaluación técnica de captura y recuperación del dióxido de carbono, la implementación del proyecto quedará a discreción de la empresa objeto de estudio. No se realizaron análisis financieros de compra de equipo ni retorno de inversión, como tampoco se analizaron los costos de operación y mantenimiento. Se entrega a la empresa objeto del estudio toda la información obtenida y la propuesta técnica sobre el proceso y los equipos necesarios para su evaluación posterior.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

El aumento promedio de la temperatura global de la tierra debido al incremento en la concentración del CO₂ en la atmósfera es sin duda el problema ambiental más importante que afronta la humanidad. Ya se mencionó que la contribución real del CO₂ al efecto invernadero es del 76% con respecto al total de los gases que provocan dicho efecto. El oxígeno y el nitrógeno, aunque se encuentran en proporción mucho mayor, no son capaces de generar el efecto invernadero. (Stern, 2006).

En su artículo sobre la necesidad de controlar las emisiones de CO₂, (Sánchez Alarcón, Pujol, & Estrany Coda, 2006) los autores indican:

“De forma natural existe en la atmósfera cierta concentración de gases de efecto invernadero que permiten retener alguna cantidad de calor de la recibida desde el sol y deja escapar al espacio el calor excedente, manteniendo así una temperatura promedio controlada en el planeta de unos 33°C por encima de la temperatura que habría si no existieran estos gases de efecto invernadero en la atmósfera. El desequilibrio se produce al aumentar de forma desmedida la concentración de estos gases en la atmósfera, porque a mayor concentración de gases, mayor es la cantidad de calor retenido en el planeta y menor el que deja escapar al espacio, provocando así que la temperatura promedio se incremente”. (Pg. 35)

En este artículo se hace ver la urgente necesidad de controlar las emisiones desmedidas de CO₂ al ambiente porque provocan que se retenga más calor del que el planeta necesita, con la consecuencia del aumento general de la temperatura promedio del planeta.

En el mismo artículo sobre la necesidad de controlar las emisiones de dióxido de carbono, (Sanchez Alarcón, Pujol, & Estrany Coda, 2006) los autores indican:

“La industria es responsable, directa o indirectamente del incremento en la concentración de CO₂, entre otros gases, y una fracción apreciable de la emisión de estos gases ocurre como resultado de actividades relacionadas con la quema de combustibles fósiles”. (Pg. 35)

Eliminar o minimizar la presencia de este gas en los gases de combustión que se emiten al ambiente, será un gran aporte a la reducción de gases de efecto invernadero emanado.

Las emisiones de CO₂ originadas por la actividad humana actual proceden principalmente de los sistemas de combustión para generar energía. Esto es práctica común desde la era de la Revolución Industrial hasta nuestros días, mediante la quema directa del combustible con aire en una cámara de combustión lo cual es la forma más sencilla y económica de extraer la energía contenida en el combustible. La quema del combustible no es más que una reacción química que convierte el combustible y el aire, por la oxidación del carbón, en gases de combustión y, en el proceso de esta conversión, libera energía en forma de calor.

El proceso de quema de los combustibles fósiles tiene como objetivo la generación de calor para la realización de trabajo y como consecuencia hay una reacción química en la cual el hidrocarburo reacciona con el oxígeno y genera nuevos componentes los cuales son emanados al ambiente como gases de combustión. Entre otros, los gases de combustión contienen dióxido de carbono, el cual es un conocido gas de efecto invernadero.

1.1 Propiedades del dióxido de carbono, CO₂

El CO₂ es uno de los gases con más abundancia en la atmósfera y juega un importante rol en los procesos de vida de plantas y animales, tales como fotosíntesis y respiración.

Por medio de la fotosíntesis, las plantas absorben dióxido de carbono, agua y energía del sol (además de otros nutrientes del suelo), y la transforma en glucosa y oxígeno, que libera al ambiente, y retiene el carbono que pasa a formar parte de la masa de la planta. Por otro lado, los animales y las plantas consumen oxígeno, además de otros elementos alimenticios, para convertirlos en energía de crecimiento y funciones vitales, liberando dióxido de carbono. Este proceso de respiración es inverso a la fotosíntesis. (Lenntech, s.f.)

El dióxido de carbono es una molécula cuya fórmula molecular es CO_2 . Esta molécula está formada por un átomo de carbono, unido a dos átomos de oxígeno, O - C - O, en una relación de 27.3% de carbono y 72.7% de oxígeno. A temperatura ambiente (20-25°C), el dióxido de carbono es un gas inodoro e incoloro, ligeramente ácido y no inflamable. (Lenntech, s.f.).

El dióxido de carbono puede disolverse en casi todos los líquidos de forma instantánea. Dicha capacidad está directamente afectada por la temperatura y presión; a mayor presión, mayor cantidad de dióxido de carbono puede retener el líquido en solución; por el contrario, a menor temperatura de la solución, mayor cantidad de dióxido de carbono puede retener la solución. Este es el efecto logrado en una bebida carbonatada, que al liberar la presión de la botella, el dióxido de carbono se libera produciendo el burbujeo efervescente característico de las bebidas gaseosas. (Lenntech, s.f.)

Las características físico-químicas del CO_2 son:

| Propiedad | Valor |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Masa molecular | 44.01 |
| Gravedad específica | 1.53 a 21 oC |
| Densidad crítica | 468 kg/m ³ |
| Concentración en el aire | 370,3 * 10 ⁷ ppm |
| pH | 3.7 a presión atmosférica |
| Estabilidad | Alta |
| Líquido | Presión > 4.158 BARg |
| Sólido | Temperatura < -78°oC |
| Constante de solubilidad de Henry | 298.15 mol/ kg * bar |
| Solubilidad en agua | 0.9 vol/vol a 20°C |

Tabla No. 1. Propiedades físico-químicas del CO₂
Fuente: Perry & Green (1997)

El ser humano utiliza el CO₂ de muchas formas en su vida cotidiana siendo el ejemplo más familiarmente utilizado, el de las bebidas carbonatadas.

1.1.1 Problemas ambientales

El planeta está rodeado por una capa gaseosa ubicada en la zona conocida como tropósfera, que es la parte baja de la atmósfera, con un espesor entre 10 y 15 kilómetros de ancho. Esta capa gaseosa, contiene los gases que controlan la temperatura del planeta, también llamados gases de efecto invernadero. Cuando la luz solar penetra al planeta, ésta rebota en la superficie terrestre y cambia su longitud de onda, al hacerlo los gases invernadero retienen parte de esta energía y la retornan a la superficie terrestre en forma de calor,

provocando que el planeta se caliente. Este proceso, comúnmente conocido como efecto invernadero, fue descubierto hace muchos años y fue más tarde confirmado por medio de experimentos de laboratorio y mediciones ambientales. (Lenntech, s.f.).

La vida tal y como se conoce es posible gracias a este efecto invernadero natural, porque este proceso regula la temperatura del planeta. Si este efecto invernadero no existiera, toda la energía que ingresa al planeta rebotaría al espacio exterior y no se retendría calor, provocando que toda la tierra se cubriera de hielo. La cantidad de calor retenida en la tropósfera determina la temperatura del planeta. La cantidad de calor que puede retener estos gases, depende de la concentración de estos en la tropósfera y del tiempo que permanecen en la atmósfera. Los gases invernadero más importantes son dióxido de carbono, los CFC's (Cloro Fluoro Carbonos, único gas no natural con efecto invernadero), óxidos de nitrógeno y metano. (Stern, 2006).

Desde el inicio de la revolución industrial en 1850, los procesos humanos han emitido gran cantidad de gases de efecto invernadero, tales como los CFC's y dióxido de carbono. Esto ha causado que la concentración de gases invernadero aumente al punto que la cantidad de calor retenida en el planeta es mayor a la que necesita. Esta adición antinatural de gases de efecto invernadero es conocida como calentamiento global. Estudios realizados respecto al calentamiento global indican que esta alteración de temperatura provocará el aumento de la actividad de tormentas, derretimiento de las placas de hielo de los polos, y por lo tanto inundaciones en los continentes habitados, y otros problemas de tipo ambiental. (Lenntech, s.f.).

1.2 Combustibles fósiles

Todos los seres vivos del planeta necesitan energía para cualquier función que desarrolla. Los hogares se deben calentar, se necesita energía para el desarrollo de la industria y la agricultura e incluso el cuerpo humano necesita un flujo constante de energía. Todos aquellos procesos que proporcionan servicios y comodidades requieren de un gasto energético. Esto es un proceso que se puede desarrollar mediante el uso de diferentes fuentes. Dichas fuentes pueden ser renovables y no renovables. Las fuentes de energía renovable se reemplazan con el tiempo y por lo tanto no desaparecen fácilmente. Las fuentes no renovables son aquellas que no se regeneran y que, según su ritmo de uso, algún día desaparecerán. (Lenntech, s.f.).

Los combustibles fósiles entran en la categoría de fuentes de energía no renovable, y representan la principal fuente de energía utilizada por la humanidad actualmente. Cuando se queman combustibles fósiles, una combustión completa convierte todo el carbón en dióxido de carbono, todo el hidrógeno en vapor de agua y todo el azufre en dióxido de azufre y como resultado final se produce calor. Ya en una combustión ideal, la reacción química produce dióxido de carbono. (The engineering tool box, s.f.).

El petróleo es el combustible más usado. El petróleo crudo consiste en muchos compuestos orgánicos diferentes que pueden ser transformados en otros tipos de combustible mediante un proceso de refinamiento. De los distintos combustibles derivados del petróleo, el Fuel Oil No.6 o búnker C es el que la industria preferiblemente utiliza para sus procesos de generación de energía, debido principalmente a su alto poder calorífico y bajo costo.

1.2.1 Fuel Oil No. 6 (Búnker C)

Los aceites combustibles se producen gracias a diferentes procesos de destilación o refinación. Los aceites combustibles se pueden usar como combustibles para motores, lámparas, calentadores, hornos, y estufas, o como solventes. (ATSDR, 2014).

Algunos aceites combustibles comunes incluyen a querosén, aceite diesel, combustibles para aviones a reacción, aceite de cocina, y aceite para calefacción. Estos aceites combustibles se distinguen uno del otro por la composición de hidrocarburos, los puntos de ebullición, los aditivos químicos, y los usos. (ATSDR, 2014).

El búnker o Fuel Oil, también conocido como combustóleo, es el residuo aceitoso producto de la destilación fragmentada del petróleo y es el combustible más pesado que se puede destilar. Dentro de la clasificación de búnker, existen seis tipos diferentes de aceites combustibles que se pueden utilizar como combustible (FEROX, 2008):

- Número 1: similar al querosén. Fracción que hierve justo luego de la gasolina.
- Número 2: aceite diésel.
- Número 3: combustible destilado poco común.
- Número 4: mezcla de Fuel Oil destilado y de residuos, tales como No. 2 y 6; sin embargo, algunas veces es tan solo un fuerte destilado. El combustible No. 4 puede ser clasificado como diésel, destilado o Fuel Oil residual.
- Los Número 5 y Número 6 son conocidos como Fuel Oil residuales o Fuel Oil pesados. En general se produce más combustible número 6 que número 5.

El combustible búnker A equivale a Fuel Oil No. 2, combustible

búnker B equivale a Fuel Oil No. 4 o No. 5 y combustible C equivale al No. 6. Debido a que el No. 6 es el más común, se usa el término "combustible búnker" como un sinónimo para el Fuel Oil No. 6.

Como ya se mencionó, el Fuel Oil No.6 es el más utilizado por la industria gracias a su bajo costo y alto poder calorífico, pero éstos combustibles tienen sus contras. En general se consideran sucios por ser contaminantes del medio ambiente. La mayoría de las objeciones son de carácter ambiental y se deben al alto contenido de azufre y cenizas que es responsable de las emisiones de partículas contaminantes, corrosión ácida y formación de óxido. (FEROX, 2008).

Tanto el alto contenido mineral como la composición molecular de los hidrocarburos implican la emisión al ambiente de altos niveles de humo, hollín, y depósitos de carbón al compararlos con combustibles destilados más refinados y limpios. Las emisiones elevadas de partículas sólidas finas o líquidas suspendidas en gases conllevan a emisiones de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno y óxido de azufre.

La composición y especificación del búnker varían ampliamente de un lugar a otro, tanto por geografía como por política, por lo que están sujetos a cambios continuos en sus requerimientos y especificaciones. Muchos combustibles de búnker contienen por lo menos productos residuales de hidrocarburos derivados del petróleo de bajo costo. En general, los combustibles de búnker son mezclas de hidrocarburos alifáticos principalmente viscosas y oscuras que usualmente son sólidas o semisólidas a temperatura ambiente y que requieren de un precalentamiento a varios grados antes de su uso. (FEROX, 2008).

La empresa objeto del estudio utiliza como combustible el Bunker C, Fuel Oil No. 6, mediante la quema directa en los hornos de las calderas para la producción de vapor saturado de agua.

1.2.2 Especificaciones para Guatemala

Para Guatemala, las especificaciones que deben cumplir los combustibles que se consumen en el país las dicta el Ministerio de Energía y Minas. Según el Acuerdo Ministerial No. 399-2012, las características y especificaciones de calidad del aceite combustible No. 6 (Fuel Oil No. 6) o Bunker C son las siguientes:

| Característica | Unidades | Método ASTM | Método Alternativo | Valores |
|------------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|----------|
| Contenido de azufre total | % masa | D-129 | D-1552 D-2622 D-4294 | 3.0 max |
| Residuo de carbón | % masa | D-524 | D-4530 | Reportar |
| Agua y sedimentos | % volumen | D-95 + D-473 | D-1796 | 2.0 max |
| Punto de inflamación | °C | D-93 | | 60 min |
| Gravedad API a 15.56°C | API kg/m ³ | D-287 | D-4052 | Reportar |
| Viscosidad cinemática a 50°C | mm ² /s | D-445 | | Reportar |
| Punto de escurrimiento | °C | D-97 | D-5949 D-5950 D-5985 | 24 max |
| Contenido total de cenizas | % masa | D-482 | | 0.1 max |
| Asfaltenos | % masa | D-3279 | | Reportar |
| Poder calorífico inferior | Mj/kg | D-240 | D-4868 | 40 min |
| Vanadio | mg/kg | D-5863 | | Reportar |

Tabla No.2. Especificaciones técnicas guatemaltecas para combustible búnker C

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, Gobierno de Guatemala (2012)

1.3 Calderas

De manera elemental se puede definir una caldera como un recipiente cerrado en el cual ingresa agua en forma continua y se calienta o evapora por la aplicación de calor. (Donlee, 1992).

El objetivo principal de una caldera es calentar agua o generar vapor, pero se debe considerar que esta función se realice con la máxima eficiencia posible de transferencia de calor, en otras palabras, la porción de calor generado en el horno que es absorbido por el agua a través de la superficie de contacto de la caldera. La transferencia de calor por las superficies calientes se puede ver mermada por el ensuciamiento de dicha superficie y los factores que contribuyen en este problema son:

- Calidad y tipo de combustible.
- Condiciones de la combustión.
- Diseño del quemador y del hogar.

Existen principalmente dos tipos de calderas utilizadas por la industria: pirotubulares y acuotubulares y sus nombres proceden principalmente de la forma cómo el agua es calentada. En la caldera pirotubular, el calor viaja por dentro de los tubos y calienta el agua fuera de ellos. En la caldera acuotubular, el agua viaja dentro de los tubos y se calienta por el calor que esta fuera de ellos. Las calderas analizadas en el presente estudio son del tipo pirotubular, por lo que son el tipo de calderas que se detallarán.

1.3.1 Calderas pirotubulares:

El nombre de caldera pirotubular deriva de la forma en que los gases de combustión viajan por la caldera para entregar el calor al agua, los cuales lo hacen dentro de tubos y el agua está por fuera,

transfiriendo el calor de adentro hacia afuera. (Donlee, 1992)

Las calderas pirotubulares consisten de un casco cilíndrico que contiene varios tubos de menor diámetro instalados a lo largo del casco por dónde se hacen pasar los gases de combustión que fueron generados en el horno. El horno se encuentra dentro del casco y conecta directamente con los tubos de fuego. Con la finalidad de aprovechar al máximo el calor de los gases de combustión, los tubos de fuego se pueden colocar de tal forma que formen varios pasos y forzar a que los gases de combustión pasen varias veces a lo largo del casco, aprovechando mejor el calor disponible.

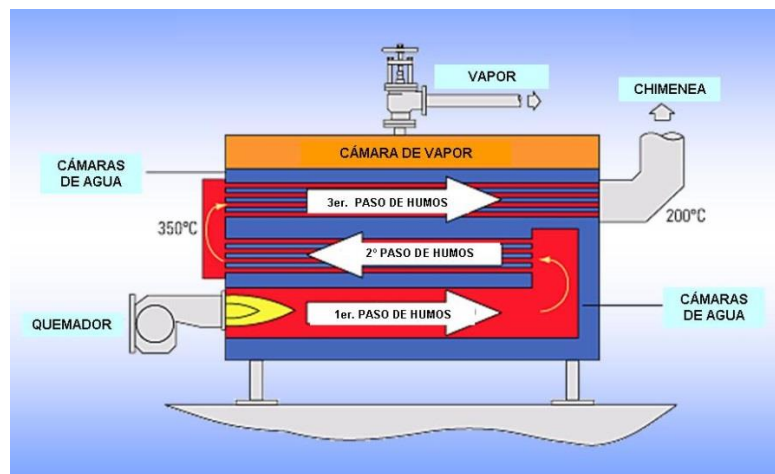


Figura No.1. Caldera pirotubular de horno interno

Fuente: Curso calderas Las Palmas. Andrés Mesa Mora. (2012)

El quemador mezcla el combustible con el oxígeno y, con la asistencia de un sistema de ignición o encendido, se produce la combustión. Esta combustión sucede en la cámara de combustión (primer paso) y el calor generado es transferido al agua por medio de los tubos que hacen la función de intercambiador de calor. (Donlee, 1992).

Eficiencia de caldera: Es el porcentaje de energía en forma de calor contenida en el combustible que es capturada por el fluido de trabajo, agua.

Una combustión completa resulta cuando el hidrocarburo se quema y produce solo dióxido de carbono, agua y calor. Si no hay suficiente oxígeno o una mezcla pobre de combustible y oxígeno, la combustión es incompleta y se pueden producir otros componentes como monóxido de carbono y combustible sin quemar. Cuando sucede combustión incompleta, la energía química del combustible no se libera completamente y la eficiencia de la combustión se reduce. Una estrategia utilizada para asegurar el suficiente suministro de oxígeno para la combustión es proveer un pequeño exceso de aire a la combustión, pero si se inyecta demasiado aire la eficiencia puede reducirse.

1.3.2 Calderas de estudio:

Para el caso particular del estudio, se utilizará la información de los gases de combustión de cada una de las calderas existentes en la empresa objeto del estudio, las cuales se describen a continuación:

- Cantidad: 4
- Tipo: Piro-tubular de tres pasos
- Potencia: 1000 BHP
- Capacidad: 15,000 kg. de vapor saturado por hora
- Presión de diseño: 125 psig (8.6 barg)
- Tipo de combustible: búnker C (Fuel Oil No.6)

1.3.3 Descripción del proceso de gases actual

La planta cuenta de cuatro calderas piro-tubulares a base de búnker para producir vapor saturado a 125 psig. De las cuatro calderas instaladas, solo tres son necesarias para cubrir la demanda de vapor

y la cuarta está fuera de servicio para mantenimiento.

Las chimeneas para los gases de combustión de las cuatro calderas están instaladas de tal forma que los gases pueden liberarse al ambiente directamente a la salida de las calderas, o pueden re direccionarse a un equipo lavador de gases que sirve para reducir la temperatura de los gases, eliminar el particulado (hollín) y reducir la concentración de gases liberados al ambiente.

El lavador de gases está compuesto por un sistema de ductos con compuertas, para manejo de los gases; un Venturi, para la precipitación de partículas y enfriamiento de gases; una columna empacada, para la eliminación del azufre; un ventilador, para inducir el flujo de los gases a través del sistema y descargarlo a una chimenea central.

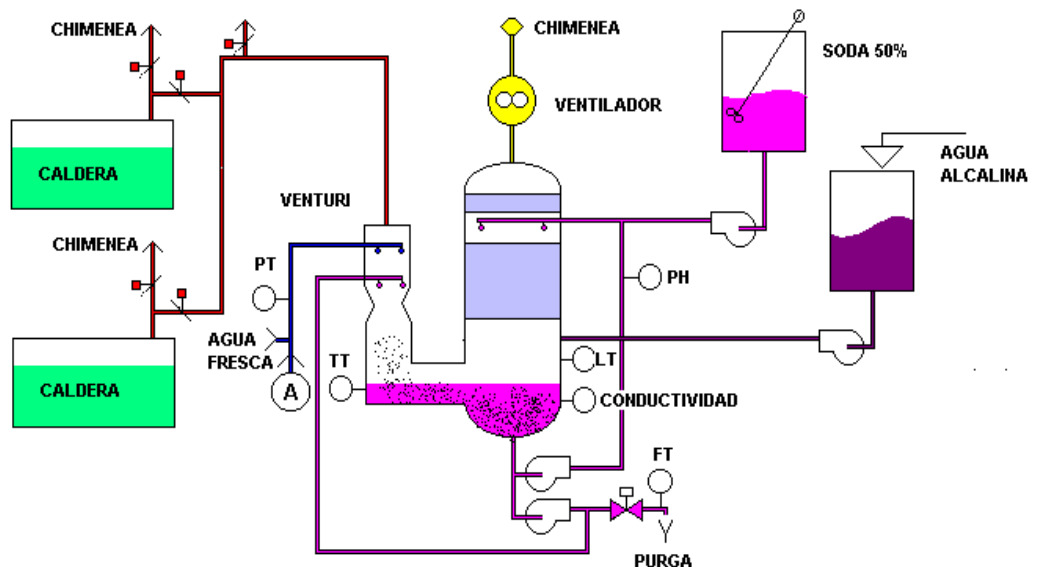


Figura No. 2 Lavador de gases de combustión

Fuente: Fisher-Klosterman, Inc. (2001)

Este lavador limpia los gases de combustión previo a su liberación al ambiente, reduciendo las emisiones de acuerdo al siguiente cuadro:

| Compuesto removido | % |
|-------------------------------------|-----|
| SO ₂ Dióxido de Azufre | 100 |
| Partículas | 99 |
| CO ₂ Dióxido de Carbono | 32 |
| CO Monóxido de Carbono | 74 |
| NO _x Oxidos de Nitrógeno | 73 |

Tabla No. 3 Porcentaje de remoción de compuestos en lavador de gases

Fuente: Elaboración propia con información tomada de datos de producción de planta objeto de estudio

De los datos anteriores, se observa que el 68% del CO₂ no es removido y es el volumen objetivo de captura de la presente investigación.

1.4 Sistemas de captura de CO₂

La quema de combustibles es el principal responsable de los problemas ambientales relevantes que actualmente afectan a la humanidad. Por ejemplo: la acumulación de gases invernadero, contaminación del aire, lluvia ácida, contaminación del suelo y agua debido a fugas y derrames, entre otros problemas. Actualmente, la quema del petróleo es responsable de 30% de las emisiones de dióxido de carbono en aire. (Lenntech, s.f.).

Evitar que dichos gases sean liberados al ambiente, representa un gran reto. El dióxido de carbono puede ser capturado mediante el uso de tecnología especializada y retirarlo de las emisiones al ambiente. El objetivo dicha tecnología es la captura del CO₂ de los gases de combustión antes de liberarlos al ambiente y obtener un flujo con alta concentración de CO₂. Ya que se cuenta con este flujo con alta concentración de CO₂, se procede a comprimirlo y procesarlo para licuarlo a alta pureza y finalmente almacenarlo.

La Fundación para Estudios sobre la Energía, en su publicación titulada *El futuro del carbón en la política energética española* en su Capítulo 6 *Tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂* describe las distintas tecnologías que se pueden utilizar para la captura del dióxido de carbono, las cuales se indican a continuación:

De forma general los sistemas de captura de CO₂ se pueden clasificar en tres grandes grupos (Fundación para estudios sobre la energía, 2008):

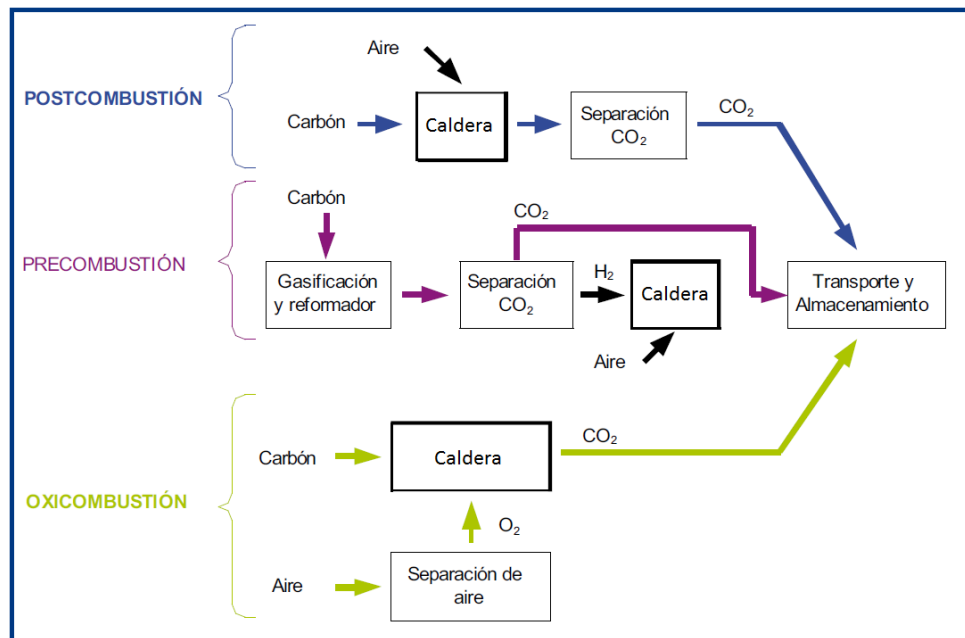


Figura No. 3. Sistemas de captura de CO₂

Fuente: Fundación para estudios sobre la energía, (2008)

En la figura anterior, se puede apreciar que existen tres tipos de tecnologías para capturar el dióxido de carbono, las que se resumen a continuación:

- **Poscombustión:** Estos sistemas se sitúan en las instalaciones una vez se ha realizado la combustión. De esta forma se parte de un flujo de baja concentración de CO₂ y alto caudal de gases de combustión.

- **Precombustión:** Estos sistemas se sitúan en las instalaciones antes de realizar la combustión. El objetivo de estos sistemas es preparar el combustible para que al realizar la combustión no se produzca CO_2 . Es decir estos sistemas eliminan el carbono del combustible antes de realizar la combustión.
- **Oxicombustión:** Estos sistemas actúan sobre el aire de combustión, tratando de eliminar el N_2 del aire y de esa forma al producirse la combustión se obtendrán los gases de combustión con una alta concentración de CO_2 .

1.4.1 Sistemas poscombustión

El objetivo de esta tecnología es concentrar el CO_2 en la corriente principal de los gases, pasando de una concentración de un 12% - 15% a una concentración próxima al 100% de CO_2 . El principal problema de esta tecnología es el alto consumo de energía que implica un alto costo de operación. (Fundación para estudios sobre la energía, 2008).

1.4.1.1 Absorción química: El método de absorción química de CO_2 es el tipo de tecnología más comúnmente utilizado por la industria para la captura de CO_2 contenido en los gases de combustión, la cual es una tecnología madura en el campo de la purificación de CO_2 . El principio de funcionamiento es la reacción química de una base alcalina, normalmente mono etil amina (MEA), en medio acuoso con un gas ácido.

Un diagrama típico de éste tipo de proceso se aprecia en la siguiente figura:

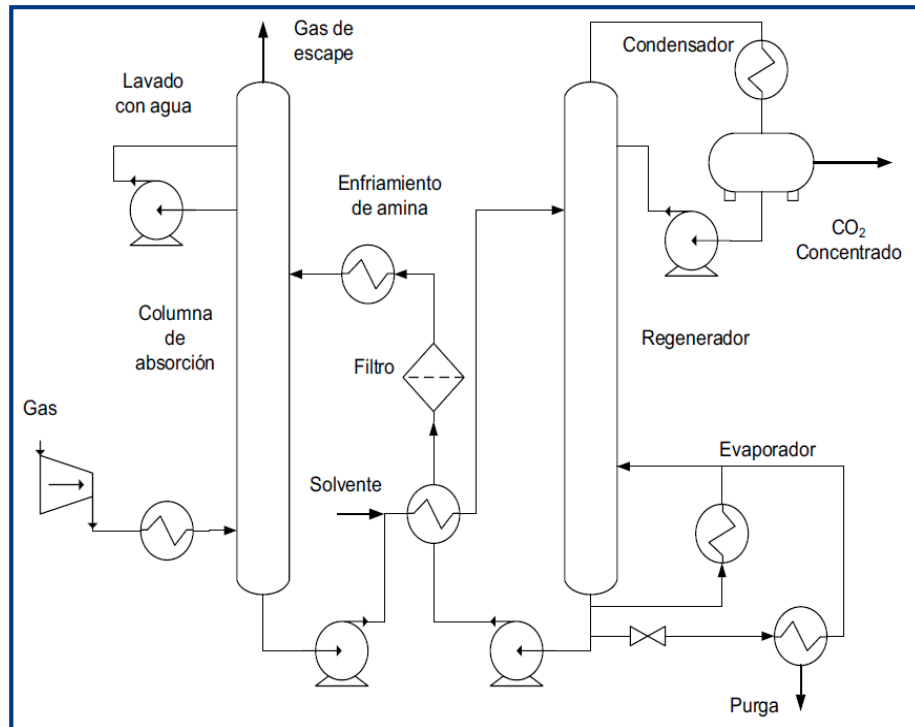


Figura No. 4. Proceso general de absorción química de CO₂
 Fuente: Fundación para estudios sobre la energía, (2008)

Posterior al enfriamiento del gas, este pasa a la columna de absorción que entran en contacto con el químico absorbente. Se requiere la instalación de un ventilador para ayudar a vencer la caída de presión que se produce a lo largo del proceso. La temperatura en el reactor se encuentra entre 40°C y 60°C. Los gases de combustión que salen de la torre de absorción son lavados con agua para que se elimine cualquier traza del absorbente que haya sido arrastrada.

El solvente enriquecido que se encuentra en el fondo de la torre de absorción es bombeado a la parte superior del regenerador, que funciona por intercambio térmico. La regeneración del solvente se lleva a cabo a elevadas

temperaturas (100°C – 140°C) y presiones ligeramente superiores a la atmosférica. La regeneración implica el uso de calor para el calentamiento del solvente con el objeto de lograr la desorción del CO₂ capturado previamente en el solvente y para la producción del vapor de agua que actúa como gas de regeneración. El vapor se recupera en un condensador y se devuelve a la columna de regeneración. El solvente se regresa a la columna de absorción y atraviesa un intercambiador de calor regenerativo.

Las condiciones que determinan si un proyecto de absorción de CO₂ es técnica y económicamente viable son:

- **Volumen del gas de combustión:** El volumen de los gases de combustión determina la dimensión del absorbedor. El absorbedor es la pieza de equipo más importante del total de los costos de inversión.
- **Concentración de CO₂:** Mientras que los gases de combustión en las chimeneas están a presión atmosférica, la presión parcial del CO₂ estará entre 0.03 bar y 0.15 bar. Bajo estas condiciones de presión parcial, la mejor opción de solvente químico serán las aminas en solución acuosa.
- **Eliminación de CO₂:** Durante la operación normal del equipo, es posible obtener recuperaciones entre 80% y 95%. La selección del grado de recuperación deseado es un parámetro económico importante, ya que a medida que se aumenta el porcentaje de recuperación es necesario aumentar la altura de la columna de absorción y así se incrementará también el costo del equipo.

- **Caudal de solvente:** El caudal de solvente determina el tamaño de la mayor parte de los equipos del absorbedor.
- **Requerimientos de energía:** El total de energía requerida será la sumatoria de la energía térmica necesaria para regenerar el solvente y la eléctrica para la operación de las bombas y los ventiladores.
- **Requerimientos de enfriamiento:** Es necesario enfriar los gases de combustión y el solvente a temperaturas óptimas requeridas para la correcta operación.
- **Pre tratamiento de los gases de combustión:** Los gases de combustión de una caldera, salen aproximadamente a 250°C, lo que significa que deben ser enfriados hasta valores de temperatura aceptables requeridos por el proceso de absorción. La mejor forma de bajarle la temperatura a los gases de combustión es poniéndolos en contacto directo a contra flujo con agua de forma que el agua absorbe la temperatura, además elimina las partículas finas que lleva en suspensión y los deposita en el fondo del recipiente.
- **Consumo de energía:** Un punto crítico en el proceso de captura de CO₂ por absorción es el alto consumo de energía que demanda. La cantidad de energía requerida es principalmente para producir el calor necesario para la regeneración del absorbente (entre 750 y 917 kWh/ton CO₂) y al consumo de energía eléctrica necesaria para la operación de las bombas y el ventilador (entre 17 y 30.5 kWh/ton CO₂).
- **Efluentes:** Producto de la descomposición de las aminas, se creará amoníaco y sales estables. Resulta indispensable

controlar que la concentración de estas sales sea baja para que no se disminuya la capacidad de absorción a la vez que se debe contar con un sistema de filtración de partículas para eliminar los subproductos indeseables.

1.4.1.2 Procesos de absorción química en investigación: Se realizan investigaciones con nuevos absorbentes para reducir el consumo de energía durante la regeneración. Otra área de investigación se basa en incrementar la concentración de las aminas conforme el tamaño de los equipos se va reduciendo. Por aparte se realizan estudios para implementar métodos de desoxidación que prevengan la degradación de las aminas por oxidación. En las mismas investigaciones se analiza la eliminación catalítica del oxígeno en los gases de combustión. (Fundación para estudios sobre la energía, 2008)

- **Absorción física:** Mientras que el proceso de absorción química opera a baja presión, la absorción física lo hace a alta presión, lo cual hace a éste proceso más adecuado para captura de CO₂ en procesos donde se gasifica el combustible. Esta tecnología aprovecha que el CO₂ tiene alta capacidad de disolución en determinados líquidos. Los gases producidos por la combustión entran en contacto con el solvente en la torre de absorción que se encuentra a alta presión, dentro de la cual hay un material de relleno que sirve para aumentar la superficie de contacto entre el CO₂ y el solvente. El solvente rico en CO₂ se bombea a la torre de desorción en la cual se separa y se desprende por un lado un flujo de CO₂ y por el otro el solvente empobrecido y regenerado.

- **Procesos con amoníaco frío:** Este es un proceso en investigación que parece muy prometedor, ya que podría reducir considerablemente el consumo energético y otros costos comparados con el resto de tecnologías y, en concreto comparado con el proceso tradicional con mono etil amina, ya que tiene hasta dos veces más capacidad de absorción de CO₂ (kg CO₂ absorbido por kg de absorbente), utiliza menor cantidad de energía calorífica para liberar el CO₂ y regenerar el absorbente (entre un 49% y 64%) además de no presentar problemas de corrosión ni degradación.
- **Membranas:** Este es un proceso usado comercialmente para eliminar el CO₂ de la combustión del gas natural a alta presión y con concentraciones altas de dióxido de carbono. El proceso hace uso de una membrana de polímeros para lograr la separación del CO₂ y como consecuencia se requiere de más consumo de energía, comparado con el proceso de absorción química que requiere menos energía. El proceso es ineficiente en términos energéticos ya que sus valores de recuperación son menores. La correcta selección de las membranas es crítico para lograr que el proceso sea viable.
- **Adsorción:** Para la adsorción del dióxido de carbono, el proceso hace uso de tamices moleculares o carbón activo. La desorción del CO₂ se logra al variar las condiciones de presión y temperatura. Lo más frecuente es variar las condiciones de presión debido a que requiere mayor cantidad de tiempo para realizar el ciclo completo de desorción durante la regeneración. Este es un proceso en estudio que aún no alcanza la etapa comercial para la utilización de esta tecnología.

- **Carbonatación-Calcinación:** Este proceso utiliza óxido de calcio (CaO o cal viva) como medio de absorción sólido a temperaturas relativamente altas. El uso de temperaturas altas en el proceso de separación del dióxido de carbono tiene como potencial ventaja el menor consumo de energía, respecto al proceso tradicional de absorción química. Los gases de combustión entran en contacto directo con la cal en un reactor, que permite la reacción de carbonatación entre el gas y el sorbente, produciendo carbonato de calcio. El producto de dicha reacción se puede separar fácilmente del flujo de gases y trasladarlo a otro reactor para la regeneración. Algo que es de suma importancia en la aplicación de este tipo de tecnología, es que el material sorbente debe tener muy buena capacidad de absorción de CO₂ y muy buena estabilidad tanto química como mecánica durante largos periodos de operación cíclica. La principal ventaja del uso de este tipo de tecnología es su bajo consumo de energía, el cual se debe a que el sistema puede recuperar gran parte de la energía (cerca del 40%) que entra en la unidad de calcinación gracias a la recirculación de las partículas sólidas.

1.4.2 Sistemas de precombustión

En este proceso, la captura de dióxido de carbono previo a la combustión, principalmente se basa en la transformación del combustible primario a gasificación, cuyos componentes principales son CO₂ y H₂, los cuales se pueden separar fácilmente. Los sistemas de captura en pre combustión se pueden aplicar a todo tipo de combustible, incluso biomasa y residuos. (Fundación para estudios sobre la energía, 2008).

1.4.3 Sistemas de oxcombustión

Esta tecnología consiste básicamente en realizar la combustión en una atmósfera rica en oxígeno, con lo que se obtiene un flujo de gases de combustión con alta concentración de CO₂. Una buena reacción lograría que solo se forme dióxido de carbono y agua, con lo que se habría logrado el propósito de concentrar el flujo de dicho gas, para su posterior captura. La dificultad de realizar la combustión con oxígeno puro es que se alcanzan temperaturas extremadamente altas (+/- 2,727°C), lo que requiere el uso de materiales altamente resistentes, especiales para soportar dichas temperaturas, lo que hace prácticamente poco viable su operación debido al alto costo de los equipos necesarios para la operación. Una forma de reducir la temperatura de los gases de combustión es recirculando los gases de escape del proceso, o por inyección de agua, hasta lograr valores adecuados para los procesos de generación de energía, lo cual resulta impráctico e ineficiente por el hecho de tener que enfriar los gases de combustión para poder usarlos en sistemas convencionales. (Fundación para estudios sobre la energía, 2008).

1.5 Proceso de licuefacción de CO₂

El dióxido de carbono en estado gaseoso a baja presión es tomado por el compresor, el cual le aumenta la presión y lo introduce a un pre enfriador de alta presión con el propósito de condensar la humedad que pueda contener, para luego llevarlo a un filtro de secado y deodorizado donde se le elimina cualquier traza de humedad (la humedad se vuelve hielo posteriormente, por lo que es sumamente crítico eliminar toda presencia de agua en el dióxido de carbono) y olor presente en el gas. Luego el gas es sometido a bajas temperaturas con el propósito de condensarlo, o volverlo líquido, para finalmente depositarlo en un tanque refrigerado a

alta presión, que lo contendrá en estado líquido hasta que sea requerido o utilizado, ya sea en el proceso de carbonatación de bebidas en estado gaseoso, para la producción de hielo seco, para cilindros de CO₂ o transporte.

El consumo de energía requerida para el proceso de licuefacción es principalmente para el compresor requerido para incrementar la presión y para producir el enfriamiento necesario para condensar el CO₂, y requiere aproximadamente 110 kWh/ton CO₂.

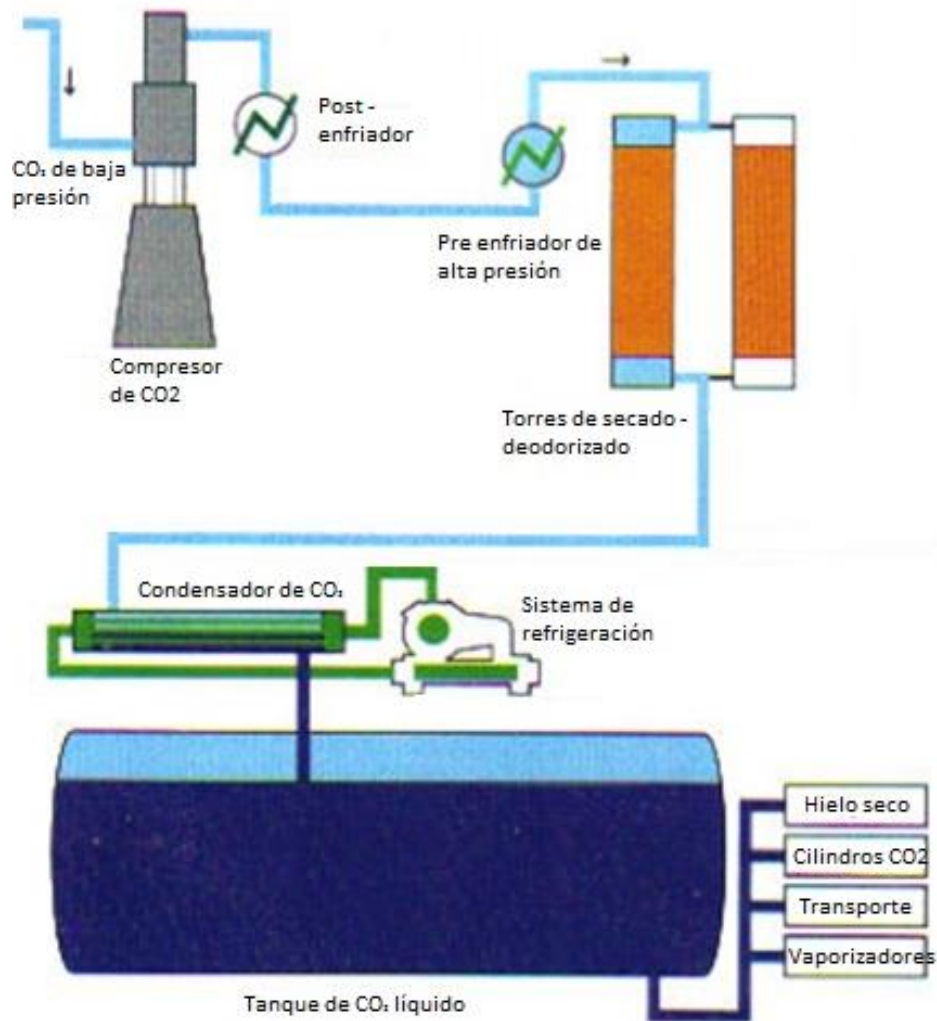


Figura No. 5 Proceso de licuefacción de CO₂
Fuente: (The Wittemann Company LLC., 2001)

CAPÍTULO 2

MÉTODOS Y TÉCNICAS

2.1 Metodología

Los métodos y técnicas usados se explican a continuación.

2.1.1 Tipo de estudio

El trabajo tiene un alcance investigativo descriptivo, en el cual se describen los componentes principales e importantes en el proyecto y analizan sus características cuantitativamente, por lo cual se puede concluir que es de tipo mixto.

2.1.2 Variables

Desde el punto de vista metodológico la investigación realizada es descriptiva de tipo cuantitativo. Las variables definidas son:

- % = Porcentaje de concentración de un gas en el volumen total.
- m³ = Volumen de gases en metros cúbicos.
- kg. = Peso en Kilogramos
- ρ = densidad

Y como indicadores se han determinado:

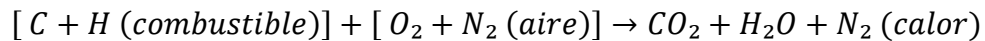
- ppm = Partes por millón de contaminantes
- T = Temperatura de los gases de combustión
- Ef.% = Eficiencia de combustión

2.1.3 Muestreo

Para conocer la cantidad de dióxido de carbono que puede capturarse, es necesario analizar cómo está la composición de los distintos gases presente en la combustión. La combustión

básicamente es la reacción química u oxidación entre el carbón de un combustible y el oxígeno del aire y como resultado se produce calor y otros gases.

Una combustión ideal debería ser:



Pero la combustión real no es ideal, debido a diversas condiciones; velocidad de combustión, contaminante en el combustible y en el aire usado para la combustión, ceniza o minerales presentes en el combustible, diseño de los equipos dónde se realice la combustión, etc., lo cual afecta la capacidad del combustible de reaccionar apropiadamente con el oxígeno y realizar la combustión ideal.

Ya que la combustión ideal no es posible, la reacción química produce gases de combustión con otros gases, contaminantes y particulado.

El análisis de gases de chimenea sirve para analizar la composición de dichos gases y así determinar cuánto CO_2 hay presente y que es susceptible de poderse recuperar.

2.1.3.2 Descripción del método de muestreo

Para la toma de muestras de los gases de combustión, se determinó que estas se tomarán durante un período de dos semanas, de lunes a viernes, haciendo uso de un analizador portátil de gases. Se realizó una lectura diaria de concentración de gases de combustión a cada una de las cuatro calderas objeto de estudio, 10 muestras en total.

Para poder hacer la toma de muestra, se aseguró que las calderas estuvieran en su régimen de máxima carga y con eficiencias de combustión igual o superior al 85%, ya que es en

estas condiciones dónde el volumen de gases de combustión es mayor y donde habrá más presencia de dióxido de carbono.

2.2 Técnicas

Cada caldera cuenta con una perforación en la base de la chimenea para realizar tomas de muestras. El analizador de gases se lleva a cada caldera e introduciendo la sonda toma muestras en la base de la chimenea de cada caldera se extrae parte de los gases que se están produciendo en la combustión.



Figura No. 6 Toma de muestra de gases de combustión

Fuente: Fotografía tomada por el autor

El analizador succiona una muestra de los gases y los analiza, mostrando en la pantalla del instrumento los resultados del análisis, tal como se muestra en la siguiente fotografía:

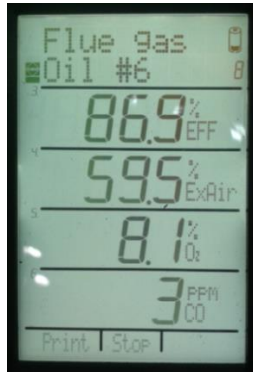


Figura No. 7 Pantalla del analizador de gases mostrando resultados

Fuente: Fotografía tomada por el autor

Estas lecturas fueron anotadas en una bitácora de campo para luego trasladar dicha información a hojas de cálculo Excel para su análisis posterior.

2.2.1 Descripción del analizador de gases

El analizador de gases es un equipo que toma una muestra de los gases de combustión directamente de la fuente y por medio de una bomba interna los hace pasar por celdas químicas que descomponen los gases en sus distintos componentes y determina el porcentaje de presencia de cada uno.

El equipo es un analizador manual portátil para análisis profesional automático de gases de combustión, con los siguientes datos.

- Marca: Testo
- Modelo: 327
- Certificado TÜV para lectura de: O₂, CO, CO₂, temperatura, eficiencia de combustión, % de exceso de aire.
- Certeza: +/- 0.2%
- Serie No. 0292402
- País de origen: USA



Figura No. 8 Analizador de gases Testo 327

Fuente: Fotografía tomada por el autor

El equipo no puede analizar la concentración de NO_x ni SO_2 , pero para los efectos de la presente investigación, estos datos no son necesarios.

El equipo utilizado está diseñado para tomar muestras directamente de la fuente, en base seca, y no puede utilizarse para mediciones en base húmeda (después del lavador de gases) ya que la presencia de humedad lo puede dañar.

2.2.2 Análisis de gases de chimenea

Los datos obtenidos en campo fueron transcritos a una hoja Excel para su tabulación y análisis estadístico.

La técnica de recolección de información consistió en tomar de diez muestras a cada una de las cuatro chimeneas de las calderas a máxima potencia para análisis de concentración de componentes. Se aseguró que en el análisis estadístico de las muestras se tuvieran desviaciones estándar menores a uno en la concentración de CO_2 que garantiza que las condiciones de las tomas son uniformes.

A cada grupo de datos de cada caldera se analizó cuál es su promedio de CO₂ y se evaluaron cuáles son las tres calderas con más aporte de CO₂.

La razón para usar el dato de las tres calderas con más aporte y obviar la cuarta, es que la empresa objeto del estudio utiliza sólo tres de las cuatro calderas para su operación normal.

Sabiendo que las calderas son iguales y que a máxima potencia el volumen de gases de cada una es el mismo, se tomaron los tres promedios y, estos a su vez se promediaron, para estimar la concentración de los gases resultantes.

2.2.3 Cálculo de CO₂ en gases de chimenea

Para determinar la densidad del CO₂ presente en los gases resultantes de la mezcla de las tres calderas, se recurrió a los estudios de Thomas Engel y Philip Reid, de su libro *Química Física*, (2006) en la que demuestran que el dióxido de carbono se puede considerar como un gas ideal, por lo que se calcula la densidad del gas usando éste principio:

De la ley de los gases ideales $PV = nRT$

P = presión (atmósferas)

V = volumen (litros)

n = número de moles de una sustancia $n = \frac{m}{MW}$

T = temperatura (K)

R = Constante de los gases = $0.0821 \frac{\text{lt x atm}}{\text{mol x K}}$

Sustituyendo $n = \frac{m}{MW}$ en $PV = nRT$

$$PV = \frac{mRT}{MW}$$

Despejando m y V de la ecuación:

$$\frac{m}{V} = \frac{PMW}{RT}$$

$$\text{Si densidad} = \rho = \frac{m}{V} \rightarrow \rho = \frac{PMW}{RT}$$

Con la densidad determinada, y conociendo el volumen de los gases de combustión, se calcula la masa de dióxido de carbono disponible por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow m = \rho V$$

ρ = densidad del CO₂ en los gases de combustión

m = masa del CO₂ en kg.

V = volumen de los gases de combustión

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Datos de gases de chimenea

Siguiendo el método descrito en el inciso 2.2.2 se realizó la captura de datos de los gases de chimenea, cuyos datos se tabularon en tablas de anexo 1, 2, 3 y 4. A continuación se resumen los valores de los promedios de los componentes de los gases de combustión de las cuatro calderas:

| Promedio | CO ppm | CO ₂ % | O ₂ % | % Eficiencia | Ex. De aire. | Temp. F |
|---------------|--------|-------------------|------------------|--------------|--------------|---------|
| Caldera No. 1 | 6.5 | 10.210 | 7.76 | 86.68 | 54.29 | 371.04 |
| Caldera No. 2 | 15.9 | 13.059 | 4.6 | 86.71 | 27.63 | 441.48 |
| Caldera No. 3 | 11.5 | 11.472 | 7.29 | 86.75 | 49.66 | 399.59 |
| Caldera No. 4 | 37.9 | 14.414 | 3.02 | 88.33 | 14.66 | 406.42 |

Tabla No. 4. Resumen de promedios de componentes de gases de combustión de las cuatro calderas

Fuente: Elaboración propia con información tomada de analizador de gases de combustión

Se observa que las calderas que mayor aporte de dióxido de carbono al ambiente tienen son las número 2, 3 y 4, por lo que se trabajará con los datos de estas.

3.2 Estimación de dióxido de carbono disponible

Siguiendo el método de cálculo descrito en el inciso 2.2.3, se tomaron los datos de los promedios de las calderas que más aporte de CO₂ tuvieron en el muestreo:

- % de CO₂: 13.06, 11.47 y 14.41.
- Promedio: 12.98 %

Para calcular la densidad de dióxido de carbono en los gases de combustión utilizando la Ley de los Gases Ideales, es necesaria la temperatura de los gases. Al igual que con la concentración de CO₂, se toman los promedios de las temperaturas correspondientes:

- Temperatura °F: 441.48, 399.59 y 406.42.
- Promedio: 415.83 °F (486.39 K)

Se sabe que cada caldera produce 25,850 metros cúbicos por hora de gases de combustión en su máximo régimen de carga, por lo que el volumen total de las tres calderas es 77,550 metros cúbicos por hora. Este es el volumen que el equipo de captura y recuperación de CO₂ debe manejar.

Debido a que los gases de combustión actualmente son re direccionados a un lavador de gases para eliminar el particulado (hollín), contaminantes y bajar la temperatura, los gases ya no son liberados a presión atmosférica, sino que al ser re direccionados exististe una presión de los gases en el ducto de 0.13 kg/cm².

Para determinar la densidad del dióxido de carbono presente en los gases de combustión resultantes de la mezcla de las tres calderas, se aplicó la ley de los gases ideales, tal como se describió en la metodología del presente trabajo, inciso 2.2.3:

De la ley de los gases ideales $PV = nRT$

El peso molecular (MW) del CO₂ es: 44.01 g/mol

$R =$ Constante de los gases = $0.0821 \frac{\text{lt x atm}}{\text{mol x K}}$

$$\rho = \frac{PMW}{RT}$$

Sustituyendo valores:

$$\rho = \frac{(0.13 \times 44.01)}{(0.0821 \times 486.39)}$$
$$\rho = 0.1432742 \text{ kg / m}^3$$

Esta densidad corresponde a CO₂ al 100% volumen / volumen. Si la concentración de éste gas en los gases de combustión está al 12.98 %, el volumen real por hora de CO₂ en los gases de combustión es:

$$V = 77,550 \times 0.1298$$

$$V = 10,066 \text{ m}^3$$

Con el dato de densidad y el volumen real por hora de CO₂ en los gases de combustión, se calcula la cantidad de CO₂ que sale de las calderas:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho V$$

$$m = 10,066 \times 0.1432742$$

$$m = 1,442.20 \text{ kg.}$$

Como ya se describió previamente, el lavador de gases absorbe el 32% de la masa de CO₂ que producen las calderas, de tal forma que el dióxido de carbono disponible por hora es:

$$m = 1,442.20 \times 0.68$$

$$m = 980.70 \text{ kg.}$$

El dato obtenido es el flujo de masa de dióxido de carbono que está saliendo por la chimenea del lavador, a máxima potencia de las calderas, y que es susceptible a la captura.

Si se aproxima a una producción de cinco días a la semana y asumiendo que la planta no trabaja en fechas de asuetos y feriados como Semana

Santa y Navidad/Año Nuevo, la planta opera 5,500 horas anuales.

$$\text{Masa anual} = 5.500 \times 980.7$$

$$\text{Masa anual} = 5,393,850 \text{ kg}$$

$$\text{Masa anual} = 5,393.85 \text{ toneladas}$$

El dióxido de carbono susceptible a ser capturado y que puede evitarse que sea liberado al ambiente es 5,394 toneladas métricas al año.

3.3 Dimensionamiento del equipo de captura

Con base a los datos calculados en el capítulo anterior, se determina que el equipo de captura necesario debe tener la capacidad de manejar el volumen de gases generado por tres calderas, a máxima potencia.

Con este flujo, y el cálculo de masa, el equipo a instalar debe tener la siguiente capacidad:

- Flujo de gases de combustión: 77,550 m³ / hora
- Flujo de masa de dióxido de carbono: 1,000 kg / hora

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo demuestra que es posible la captura del dióxido de carbono proveniente de los gases de combustión producidos en calderas que queman combustible búnker C (Fuel Oil No.6), evitando que este gas de efecto invernadero sea liberado al ambiente. Mediante la instalación de la tecnología y el proceso adecuado, se puede capturar el dióxido de carbono y tratarlo para que se pueda utilizar posteriormente en la carbonatación de bebidas.

Los análisis de gases de combustión efectuados a las calderas, se realizaron por medio de tomas de diez muestras de gases de chimenea a cada caldera a máxima potencia para asegurar el máximo dióxido de carbono que se puede producir en la combustión, asegurando que la eficiencia de combustión de cada caldera fuera igual o superior al 85% que garantiza que la reacción química de la combustión produce bajo monóxido de carbono.

De las cuatro calderas analizadas se tomaron las tres con mayor aporte medio de dióxido de carbono y se obviaron los datos de la caldera que menor aporte tuvo. La razón es que la empresa objeto del estudio, utiliza solo tres de las cuatro calderas para su operación normal y la cuarta está en disponibilidad o mantenimiento, además que para objeto de diseño, se necesita conocer cuáles son las máximas condiciones de operación.

La presencia de dióxido de carbono en los gases de combustión, en promedio de tres calderas, es de 12.89% del volumen total de los gases de chimenea, que representa un flujo de 1,428 kilogramos por hora emitidos por las calderas. Gracias al uso de un lavador de gases de combustión, que elimina el 32% de CO₂ del flujo de emisiones, al ambiente se liberan ya solo 980.70 kilogramos por hora de éste gas de efecto invernadero, cerca de 5,400 toneladas métricas por año, masa la cual es el objetivo de captura y recuperación para su uso posterior en la carbonatación de bebidas.

Con la información obtenida, se determina que es posible técnicamente la captura del CO₂ generado por la combustión de búnker en las calderas de la empresa objeto de estudio, mediante la instalación de un sistema de desviación de gases de chimenea hacia un equipo de captura y absorción.

La información técnica revisada y el estudio a la experiencia obtenida en proyectos de captura a plantas generadoras de electricidad existentes en otros países, permite concluir que existen distintos tipos de tecnología de captura, las cuales se pueden resumir en tres tipos: precombustión, oxicombustión y poscombustión.

4.1 Selección de tecnología de captura

Como se indicó en el Capítulo 1, inciso 1.4., existen tres métodos para la captura del dióxido de carbono, y qué tecnología se utilice depende principalmente de cómo se quiera capturar dicho gas, así como de la inversión económica que se deba hacer en la adquisición de los distintos equipos.

Repasando los conceptos, las tres tecnologías existentes son:

- **Poscombustión:** Sistemas se sitúan en las instalaciones una vez se ha realizado la combustión. De esta forma se parte de un flujo de baja concentración de dióxido de carbono y alto caudal de gases de combustión y procesarlo para aumentar la concentración del CO₂ a bajo flujo.
- **Precombustión:** Son sistemas que se sitúan en las instalaciones antes de realizar la combustión. El objetivo de estos sistemas es preparar el combustible para que al realizar la combustión no se produzca CO₂. Es decir estos sistemas eliminan el carbono del combustible antes de realizar la combustión.

- **Oxicombustión:** Estos sistemas actúan sobre el aire de combustión, tratando de eliminar el N_2 del aire y de esa forma al producirse la combustión se obtendrán los gases de combustión con una alta concentración de CO_2 .

Luego de observar los equipos instalados en la empresa objeto del estudio, se aprecia que la empresa ya cuenta con todos los equipos y accesorios necesarios para la generación de vapor por medio de la quema de combustible tipo búnker C (Fuel Oil No. 6) y que además cuenta con un equipo de limpieza de gases de combustión y una planta de recuperación, purificación y procesamiento de dióxido de carbono. Considerando los equipos instalados actualmente y proyectando el uso de la instalación y la tecnología que requiere la menor inversión, se determina que la mejor opción técnica es el uso de la tecnología de captura de dióxido de carbono por absorción química en poscombustión, ya que requiere la menor instalación de equipos nuevos y por lo tanto menos procesos adicionales, lo que implica que es la opción más económica.

La tecnología de precombustión no le sirve a sus propósitos, ya que esta tecnología básicamente consiste en producir un compuesto gaseoso principalmente de hidrógeno y dióxido de carbono para posteriormente separar estos dos gases. La separación se basa en la des carbonización del combustible antes de la combustión mediante técnicas de gasificación del carbón y dejar solamente hidrógeno, eliminando la formación de dióxido de carbono en los gases de combustión, lo que implica invertir en equipos y operación para realizar la gasificación del combustible y el uso de calderas especialmente preparadas para quemar hidrógeno para la producción de vapor, para no obtener un beneficio productivo más que solo la no emisión de dióxido de carbono al ambiente.

La tecnología de oxidación no es rentable, ya que consiste en utilizar un flujo rico en oxígeno para realizar la combustión y así concentrar el CO_2 en los gases de combustión, pero también necesita el uso de postcombustión para capturar ese CO_2 , lo que implica el uso de dos tecnologías diferentes y así el costo de equipos, que debido a las altas temperaturas que se alcanzan los equipos deben ser más robustos y por lo tanto más costosos, además del consumo de energía, operación y mantenimiento.

4.2 Descripción del proceso de captura y absorción de CO_2

El objetivo de esta tecnología es tomar el dióxido de carbono del flujo de gases de combustión salientes y separarlos de los otros gases presentes. Una vez capturado el CO_2 , se concentrará del 12.89% actual a un valor cercano al 100% de CO_2 .

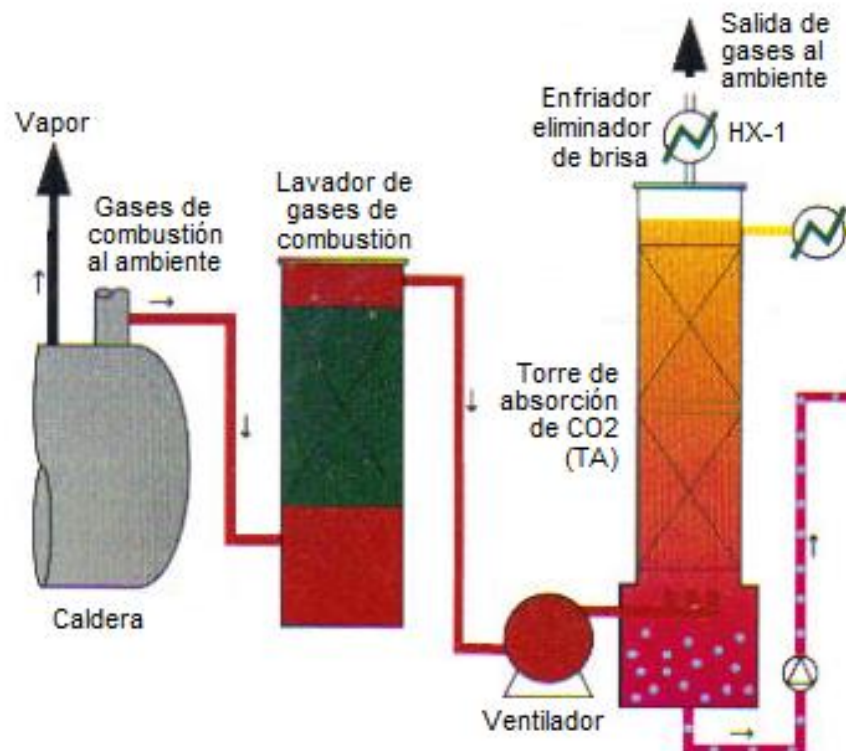


Figura No. 9. Derivación de gases de combustión a torre de absorción
Fuente: (The Wittemann Company LLC., 2001)

El gas, proveniente del lavador de gases, que ya se encuentra a baja temperatura y libre de partículas sólidas, es succionado por un ventilador centrífugo que aumenta la presión del gas de combustión lo suficiente para vencer la caída de presión de la torre de absorción. (Fundación para estudios sobre la energía, 2008)

Los gases de combustión entran a la torre de absorción (TA) por la parte baja de esta y suben viajando contra flujo donde entran en contacto con una solución acuosa absorbente, monoetilamina (MEA), la cual reacciona únicamente con el CO₂ y lo captura, dejando los demás gases viajar en el flujo ascendente hasta el extremo superior de la torre, donde son liberados al ambiente. La solución acuosa, rica en CO₂, baja al fondo de la torre, donde es bombeada al vaporizador. (The Wittemann Company LLC., 2001)

La solución de MEA, rica en CO₂ es bombeada al precalentador (HX-2) que consiste en un intercambiador de calor que eleva la temperatura de la solución para luego introducirla a la torre de destilación (TD) por la parte superior de ésta. La solución precalentada, baja por efecto de gravedad al fondo de la torre a un sobre calentador (HX-3), que opera con vapor. La solución sobrecalentada es recirculada en el destilador para aumentar la temperatura y luego bombeada del fondo del destilador de regreso a la torre de absorción (TA), pero primero pasa por el pre calentador (HX-1) para precalentar la solución entrante a la torre de destilación (TD) y enfriar la solución que va a la torre de absorción (TA). La solución se vuelve a enfriar (HX-4) antes de entrar a la torre de absorción (TA) por la parte superior y baja contracorriente con los gases de combustión, enriqueciendo así la solución MEA con CO₂.

En la parte superior de la torre de absorción se instala un enfriador (HX-1) eliminador de brisa, cuya función es capturar la solución acuosa que pudo migrar con el flujo de gases salientes y retorna la solución a la torre liberando los gases secos al ambiente. Este proceso reduce la pérdida de MEA al ambiente, reduciendo la necesidad de reponerla en grandes cantidades. (The Wittemann Company LLC., 2001)

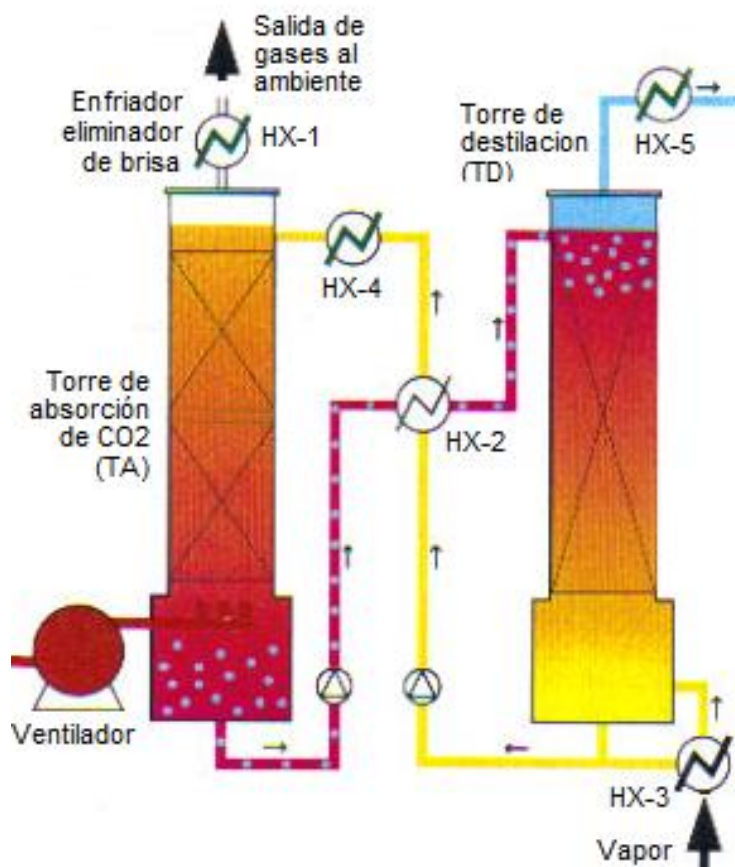


Figura No. 10. Ciclo de captura de CO₂
Fuente: (The Wittemann Company LLC., 2001)

En la torre de destilación (TD), conforme la solución MEA entrante sea más rica en CO₂, al ir bajando por la torre el calor hace que el CO₂ y el agua se liberen de la MEA y suben a la parte alta de la torre donde los vapores se enfrían (HX-5) con el objeto de condensar el agua y la

solución acuosa MEA que pudiese migrar con el flujo, y deja libre al CO₂, retornando la solución de MEA y agua a la torre de evaporación. La solución MEA empobrecida que cae al fondo de la torre e inicia otro ciclo en el proceso descrito en el párrafo anterior.

El CO₂ gaseoso es enviado a un banco de filtros de alta eficiencia para remover: espuma, trazas de solución MEA, impurezas remanentes de la combustión y olor. Posterior a la filtración, el CO₂ está listo para enviarlo a la planta existente de compresión, purificación, licuefacción y almacenamiento, dónde la empresa objeto de estudio lo utiliza en sus procesos de carbonatación de bebidas.

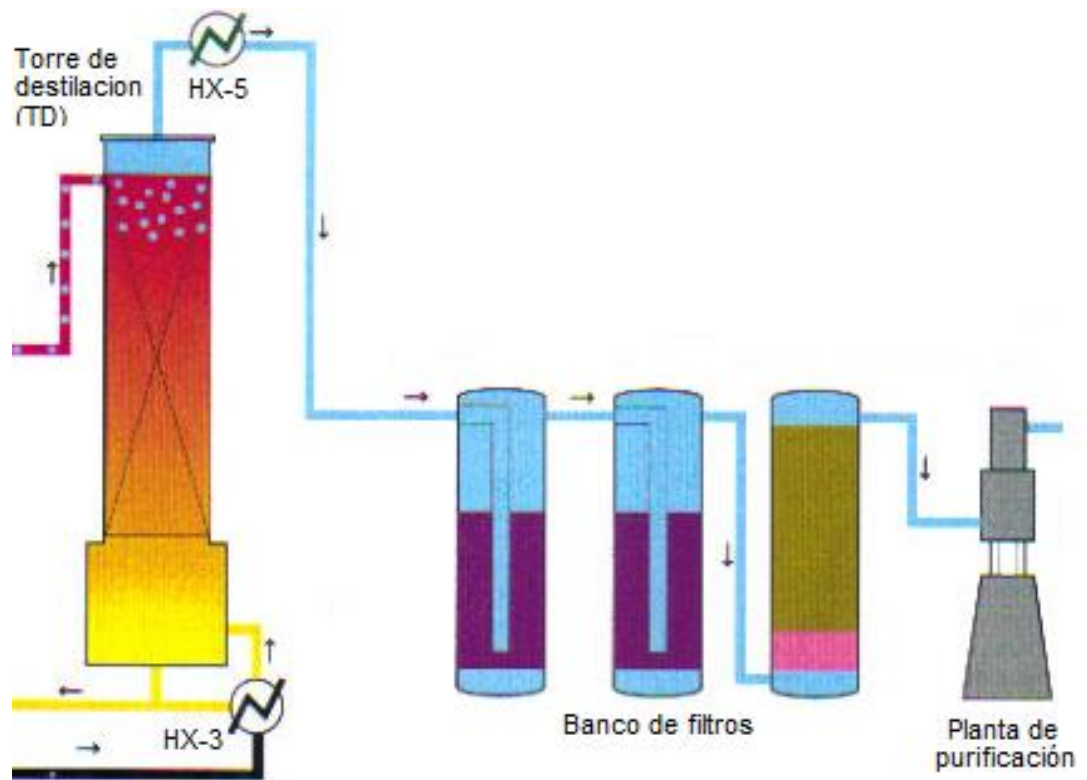


Figura No. 11. Destilación y filtración de CO₂
Fuente: (The Wittemann Company LLC., 2001)

4.3 Descripción del equipo de captura

Los equipos ya fueron identificados en la sección anterior, ahora se describirá en qué consiste cada uno de ellos. No se entrará a conocer los intercambiadores de calor, ya que son sistemas simples que no necesitan mayor explicación. Debido a lo corrosivo del proceso de captura y recuperación, el material de construcción de todos los equipos involucrados en el proceso, hasta la salida del CO₂ de los filtros, deben ser de acero inoxidable.

Ventilador: Consiste en un ventilador tipo centrífugo capaz de mover 77,550 metros cúbicos por hora. El ventilador succiona los gases de combustión de la torre lavadora y les eleva la presión para que puedan ingresar a la torre de absorción. El ventilador contará con una válvula de control de flujo en la admisión que estará regulando el paso de gases al ventilador de acuerdo a cuántas calderas estén funcionando y el régimen de carga en el que se encuentren.

Torre de absorción: Consiste de una torre o tubo vertical cerrado en la parte inferior y abierta a la atmósfera en la parte superior, en cuyo interior se coloca una cama de empaquetadura o material de contacto. El objetivo del material de relleno es aumentar la superficie de contacto entre los gases de combustión ascendentes y la solución MEA, favoreciendo así que la solución tenga mayor oportunidad de capturar el CO₂. La torre cuenta con un sumidero o fosa dónde se deposita la solución MEA enriquecida con dióxido de carbono. El sumidero está conectado, mediante tubería, a una bomba centrífuga que toma la solución enriquecida y la envía al siguiente proceso. En la parte alta de la torre se coloca una serie de rociadores que inyectan la solución empobrecida de MEA y lo dejan caer sobre el material de relleno. En la parte más alta de la torre se instala un enfriador de gases y eliminador

de brisa cuyo objeto es condensar y capturar la solución MEA que pudiera viajar con los gases de combustión salientes y reducir la pérdida de éste material.

Solución MEA: Es la solución acuosa que reacciona con el dióxido de carbono y lo captura. La solución es una mezcla de agua y mono etil amina (MEA) al 30%. La MEA es un compuesto químico orgánico que es tanto amina como alcohol, en la que los radicales libres de la amina hacen que el CO_2 se combine con ella dando un compuesto que necesita muy poca energía para descomponerse y liberar el CO_2 , regenerando la amina. Este compuesto es muy delicado de manejar, y debe ser manipulado con extremo cuidado, ya que es tóxico, inflamable, corrosivo, incoloro y viscoso. (Fundación para estudios sobre la energía, 2008)

Torre de destilación: Esta torre es un cilindro vertical que contiene una serie de platos perforados colocados en distintos niveles de la torre, la intención es aumentar el área de contacto de la solución enriquecida de MEA con la superficie metálica caliente para incrementar la temperatura, y facilitar el desprendimiento de la mezcla agua/dióxido de carbono. La solución enriquecida de MEA, proveniente del pre calentador HX-2, entra por la parte superior de la torre y es rociada sobre los platos perforados calientes y conforme baja por la torre empieza a ganar temperatura. Al calentarse evapora agua y CO_2 , la cual sube a la parte alta de la torre. En la parte baja de la torre hay un intercambiador de calor que está constantemente calentando la solución enriquecida de MEA y recirculándola a la torre para inyectar la energía necesaria para separar la amina de la solución agua/ CO_2 . La solución acuosa MEA empobrecida cae al sumidero y es bombeada hacia la torre de absorción, pero primero pasa por el pre calentador HX-2 para ceder parte de la energía calorífica

a la solución enriquecida entrante. La solución agua/CO₂ que sube a la parte alta de la torre, entra a un enfriador que condensa el agua y deja en estado gaseoso el CO₂ el cual sale de la torre hacia los filtros de alta eficiencia. (The Wittemann Company LLC., 2001)

Filtros de alta eficiencia: Estos se encuentran al final del proceso de captura y recuperación. Sirven para eliminar: espuma, olor, vapor de agua, trazas de amina (MEA), y en menor grado partículas sólidas que pudieran pasar de los procesos anteriores. El primer filtro es un burbujeador de permanganato de potasio (KMnO₄), del cual se recomienda usar dos de estos filtros en serie, por la saturación del primero, el segundo captura lo que se pueda pasar). El CO₂ entra al recipiente y burbujea en el químico, oxidando impurezas como trazas de MEA y contaminantes de la combustión (NO_x, componentes azufrados, etc.). El último filtro es para eliminar olores al CO₂ y consiste en un recipiente con carbón activado. Se recomienda la instalación de dos de éstos filtros en paralelo ya que éste tipo de filtro necesita regenerarse (lavarse) con vapor para eliminar los contaminantes absorbidos en el proceso y durante el proceso de regeneración no puede filtrar.

Se debe considerar que esta tecnología de captura requiere el uso un compuesto químico orgánico denominado monoetilamina (MEA), una amina con la capacidad de retener CO₂ y liberarlo fácilmente con la aplicación de energía. Este compuesto es muy delicado de manejar, y debe ser manipulado con extremo cuidado ya que es tóxico, inflamable, corrosivo, incoloro y viscoso. También es necesario el uso de vapor de agua para el calentamiento de la monoetilamina y electricidad para la operación de los sistemas de bombeo, ventilación y enfriamiento.

4.4 Beneficios de la implementación del equipo de captura

Que la empresa objeto del presente estudio pueda capturar el gas carbónico de los gases de combustión, le otorga otro beneficio adicional al de no emitirlo al ambiente, le representa autonomía total sobre su requerimiento de suministro de dicho gas, ya que del 100% del gas susceptible de captura, la empresa sólo requiere el 68.60% de dicho gas para cubrir su demanda actual, y el resto lo puede comercializar al precio del mercado. Se debe considerar que el equipo de captura de dióxido de carbono no puede recuperar el 100% del gas disponible, ya que la eficiencia de captura está directamente relacionada con la altura de la torre de absorción, a más altura, más eficiente la captura, pero también mayor es el costo de dicha torre.

La aplicación de la presente investigación, no solo es útil para la empresa objeto de estudio, sino que puede ser la base para el análisis y aplicación en otras industrias que utilicen combustibles fósiles, e incluso biomasa, para la generación de energía y que en sus procesos de manufactura utilicen el dióxido de carbono capturado, lo cual contribuiría a la reducción de la emisión de dióxido de carbono al ambiente además de reducir sus costos de producción y la dependencia de compra de este gas. También abre la oportunidad a nuevos mercados y oportunidades de negocio para comercializar el dióxido de carbono capturado de sus gases de combustión a industrias o sectores comerciales que requieran de CO₂.

Otro aspecto a considerar es que las tendencias de mercado van a la globalización y el comercio internacional, lo cual demanda cada vez más que los procesos con los que se realizan los productos comercializados cumplan con normas de baja contaminación, como el caso de la huella de carbono, en la que presentan mejor oportunidad de negocio aquellos

productos cuya huella sea baja. Al reducir las emisiones al ambiente de dióxido de carbono, automáticamente reducen su huella de carbono y mejoran las oportunidades de negocio, por lo que la aplicación de tecnologías de captura, no sólo reduce la contaminación, sino que abre la oportunidad de realizar negocios y comercio con países que ya demandan el cumplimiento de compromisos de baja contaminación.

CONCLUSIONES

1. Los análisis de gases de chimenea efectuados a cada una de las cuatro calderas, permite identificar que el promedio de CO₂ emitido por las tres calderas trabajando a plena carga es de aproximadamente 1,442 kilogramos por hora, y que el lavador de gases elimina el 32% de esta masa, por lo que al ambiente se libera anualmente un estimado de 5,394 toneladas métricas de CO₂.
2. Es posible técnicamente capturar el CO₂ generado por la combustión de búnker en las calderas de la empresa objeto de estudio, mediante la instalación de un sistema de desviación de gases de chimenea hacia un equipo de captura y absorción.
3. La tecnología de captura de CO₂ que mejor se adapta a las condiciones de operación de las calderas de la planta es la de absorción química en post combustión, ya que las calderas son equipos que ya están funcionando y sólo requieren eliminar el CO₂ de los gases producidos.
4. El equipo de captura de CO₂ necesario para las condiciones determinadas en el estudio, debe tener la capacidad de procesar 77,550 metros cúbicos por hora de flujo de gases de combustión y 1,000 kilogramos por hora de captura de dióxido de carbono.
5. Implementar el sistema de captura, le representa a la empresa objeto del estudio, autonomía total sobre el suministro de dióxido de carbono como materia prima para su proceso de carbonatación de bebidas, ya que del total de gas disponible para la captura, la empresa necesita sólo el 68.6%, lo que le permite comercializar el excedente a precio de mercado.

RECOMENDACIONES

1. Estimar el costo de adquisición, montaje y operación del equipo de captura y absorción de CO₂, así como realizar el análisis financiero de inversión y retorno de capital para la adquisición del equipo indicado, considerando la reducción aproximada máxima de 5,394 toneladas métricas anuales de CO₂ que la empresa recuperará de los gases de combustión y que no deberá comprar para su proceso de carbonatación de bebidas.
2. Mantener la eficiencia de combustión de las calderas arriba del 85%, ya que a menor eficiencia disminuye la concentración de CO₂ generado y se incrementa el porcentaje de monóxido de carbono, el cual es combustible no quemado, además de un contaminante ambiental que no puede ser capturado.
3. Realizar investigaciones futuras para evaluar si es posible la captura de CO₂ cuando se quema otros tipos de combustible.

BIBLIOGRAFÍA

- ATSDR, A. p. (5 de Mayo de 2014). *atsdr.cdc.gov*. Recuperado el 3 de Junio de 2014, de http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts75.html
- Barchas, R., & Davis, R. (1992). *Crest Technology for the Recovery of CO2*. Energy Conversion and Management, EEUU.
- Donlee. (1992). *Boiler Theory*. (D. Technologies, Ed.) New York,, USA: Educational Services Division.
- Eastern Research Group. (1998). *Fuel Oil Combustion*. North Carolina, USA.
- Engel, T., & Reid, P. (2006). *Química Física* (1st. ed.). (M. Martin-Romo, Ed.) Madrid, España: Pearson, Addison Wesley.
- FEROX, I. (2008). *Reporte técnico No. 59, BUNKER*. Reporte técnico, ferox International.
- Forero, C. (2011). *Combustión de gas con captura de CO2 mediante transportadores sólidos de oxígeno basados en CuO*. (T. doctoral, Ed.) Zaragoza, España: Universidad del Valle.
- Fundación Eroski. (4 de Noviembre de 2004). *www.consumer.es*. Recuperado el 10 de marzo de 2014, de http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/11/04/146723.php
- Fundación para estudios sobre la energía. (2008). *El futuro del carbón en la política energética española*. Madrid, España: TIASA.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2005). *La captación y almacenamiento de dióxido de carbono*. IPCC, OMM, PNUMA, U.N., Naciones Unidas.
- Heumann, W. (1997). *Air Pollution Control Systems* (1st. ed.). N.Y., USA: McGraw-Hill.
- Lenntech. (s.f.). *www.lenntech.es*. Recuperado el Febrero de 2014, de <http://www.lenntech.es/dioxido-de-carbono.htm>
- López Fuentes, A. L. (s.f.). *Diseño y montaje de una instalación de laboratorio para la caracterización y desarrollo de absorbentes de CO2 basados en aminas*. Universidad de Sevilla. Sevilla: Universitaria.

- Perry, R. H., & Green, D. W. (1997). *Chemical Engineer's Handbook* (7a ed.). New York: McGraw-Hill.
- Robinson, A., Robinson, N., & Soon, W. (2008). *Efectos ambientales de los incrementos atmosféricos de dióxido de carbono*. Oregon, USA: Instituto de Ciencia y Medicina de Oregon.
- Sanchez Alarcón, J. A., Pujol, R. O., & Estrany Coda, F. (febrero de 2006). *www.tecnicaindustrial.es*. Recuperado el Diciembre de 2013, de <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/21/35/a35.pdf>
- Stern, N. (2006). *La economía del cambio climático*. Evaluación del cambio climático sobre la economía, Reino Unido.
- The engineering tool box. (s.f.). *Theengineeringtoolbox*. Recuperado el Junio de 2014, de http://www.engineeringtoolbox.com/boiler-efficiency-d_438.html
- The Wittemann Company LLC. (2001). CO2 Recovery System. EEUU.
- Union Europea. (s.f.). <http://europa.eu>. Recuperado el Diciembre de 2013, de http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/l28074_es.htm
- Universidad de Navarra. (s.f.). *Ciencias de la Tierra y del medio ambiente*. Recuperado el 10 de Febrero de 2014, de www.tecnun.es: <http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/10CAtm1/350CaCli.htm>
- Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., Sidders, J., Ramshaw, C., & Yeung, H. (2011). *Post-combustion CO2 Capture with Chemical Absorption*. School of Engineering, Cranfield University, Process Systems Engineering Group, Cranfield, UK.
- Yukun, H. (2011). *CO2 capture from oxy-fuel combustion power plants*. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.

ANEXOS

| Caldera No.1 | CO ppm | CO2 % | O2 % | % Eficiencia | Ex. De aire. | Temp. F |
|---------------|--------|-------|------|--------------|--------------|---------|
| Dia 1 | 6 | 9.2 | 8.8 | 87.2 | 60.4 | 320.2 |
| Dia 2 | 5 | 9.3 | 8.5 | 87.4 | 56.2 | 322.2 |
| Dia 3 | 6 | 9.5 | 7.9 | 86.2 | 65.2 | 350.2 |
| Dia 4 | 11 | 11.92 | 6 | 86.9 | 37.9 | 430.3 |
| Dia 5 | 4 | 11.2 | 6.9 | 86.4 | 46.4 | 418.1 |
| Dia 6 | 6 | 11.34 | 6.5 | 86.1 | 48.7 | 421.5 |
| Dia 7 | 6 | 9.8 | 7.5 | 86.8 | 52.2 | 356.2 |
| Dia 8 | 9 | 9.7 | 8.8 | 86 | 60.2 | 365 |
| Dia 9 | 9 | 9.9 | 8.6 | 86.4 | 56.2 | 363.1 |
| Dia 10 | 3 | 10.24 | 8.1 | 87.4 | 59.5 | 363.6 |
| Promedio | 6.5 | 10.21 | 7.76 | 86.68 | 54.29 | 371.04 |
| Desv estándar | 2.46 | 0.95 | 1.00 | 0.53 | 8.11 | 39.51 |

Anexo No. 1. Análisis de gases de combustión de caldera No. 1

Fuente: Elaboración propia con información tomada de analizador de gases de combustión

| Caldera No.2 | CO ppm | CO2 % | O2 % | % Eficiencia | Ex. De aire. | Temp. F |
|---------------|--------|-------|------|--------------|--------------|---------|
| Dia 1 | 19 | 13.4 | 4.1 | 88 | 23 | 417.9 |
| Dia 2 | 22 | 12.8 | 5.6 | 87.2 | 35 | 415 |
| Dia 3 | 9 | 13.19 | 4.4 | 87.2 | 25.1 | 441.5 |
| Dia 4 | 17 | 13.59 | 3.9 | 87 | 21.6 | 448.4 |
| Dia 5 | 5 | 12.87 | 4.8 | 86.8 | 28.1 | 449.6 |
| Dia 6 | 15 | 13.13 | 4.2 | 86.3 | 30.1 | 447.8 |
| Dia 7 | 16 | 12.55 | 5.2 | 85.6 | 31.2 | 452.9 |
| Dia 8 | 25 | 13.59 | 3.9 | 86.3 | 21.6 | 443.2 |
| Dia 9 | 16 | 12.55 | 5.2 | 85.6 | 31.2 | 453.9 |
| Dia 10 | 15 | 12.89 | 4.7 | 87.1 | 29.4 | 444.6 |
| Promedio | 15.9 | 13.06 | 4.6 | 86.71 | 27.63 | 441.48 |
| Desv estándar | 5.76 | 0.39 | 0.60 | 0.76 | 4.59 | 13.78 |

Anexo No. 2. Análisis de gases de combustión de caldera No. 2

Fuente: Elaboración propia con información tomada de analizador de gases de combustión

| Caldera No.3 | CO ppm | CO2 % | O2 % | % Eficiencia | Ex. De aire. | Temp. F |
|---------------|--------|-------|------|--------------|--------------|---------|
| Dia 1 | 6 | 11.0 | 7.1 | 87.7 | 48.4 | 371.3 |
| Dia 2 | 8 | 11.3 | 9.6 | 86.5 | 69.5 | 373.2 |
| Dia 3 | 8 | 11.5 | 8.9 | 87.2 | 50.2 | 374.1 |
| Dia 4 | 11 | 10.96 | 7.2 | 86.4 | 49.5 | 417 |
| Dia 5 | 15 | 11.2 | 6.9 | 86 | 46.4 | 427.7 |
| Dia 6 | 11 | 11.52 | 7.7 | 85.9 | 54.8 | 411.8 |
| Dia 7 | 8 | 11.4 | 8.4 | 87.8 | 45.2 | 372.1 |
| Dia 8 | 13 | 11.22 | 6.8 | 86.2 | 40.2 | 430.2 |
| Dia 9 | 7 | 12.5 | 4.5 | 86.8 | 56.2 | 392.3 |
| Dia 10 | 28 | 12.08 | 5.8 | 87 | 36.2 | 426.2 |
| Promedio | 11.5 | 11.47 | 7.29 | 86.75 | 49.66 | 399.59 |
| Desv estándar | 6.45 | 0.48 | 1.48 | 0.67 | 9.22 | 25.48 |

Anexo No. 3. Análisis de gases de combustión de caldera No. 3

Fuente: Elaboración propia con información tomada de analizador de gases de combustión

| Caldera No.4 | CO ppm | CO2 % | O2 % | % Eficiencia | Ex. De aire. | Temp. F |
|---------------|--------|-------|------|--------------|--------------|---------|
| Dia 1 | 21 | 14.2 | 3.5 | 88.2 | 16.2 | 399 |
| Dia 2 | 20 | 14.16 | 3.4 | 88.4 | 15 | 400 |
| Dia 3 | 20 | 14.18 | 3.3 | 88.4 | 15.2 | 401 |
| Dia 4 | 41 | 14.1 | 3.8 | 88.4 | 16.9 | 379.6 |
| Dia 5 | 60 | 14.63 | 2.6 | 88.1 | 13.4 | 423.8 |
| Dia 6 | 49 | 14.35 | 2.9 | 88 | 15.6 | 419.3 |
| Dia 7 | 29 | 14.32 | 3 | 88.1 | 18.2 | 420.1 |
| Dia 8 | 62 | 15.03 | 2.1 | 88.9 | 10.5 | 410.2 |
| Dia 9 | 55 | 14.89 | 2.8 | 88.2 | 13.5 | 415.2 |
| Dia 10 | 22 | 14.28 | 2.8 | 88.6 | 12.1 | 396 |
| Promedio | 37.9 | 14.41 | 3.02 | 88.33 | 14.66 | 406.42 |
| Desv estándar | 17.49 | 0.32 | 0.49 | 0.27 | 2.31 | 13.74 |

Anexo No. 4. Análisis de gases de combustión de caldera No. 4

Fuente: Elaboración propia con información tomada de analizador de gases de combustión

| Parámetro | Concentración | Período de medición |
|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Dióxido de Azufre, SO ₂ | 30 ppb | Anual |
| | 140 ppb | 24 h |
| Partículas PM ₁₀ | 150 ug/m ³ | 24 h |
| Partículas PM _{2.5} | 65 ug/m ³ | 24 h |
| Monóxido de Carbono, CO | 9 ppm | 8 h |
| | 35 ppm | 1 h |
| Ozono, O ₃ | 120 ppb | 1 h |
| | 80 ppb | 8 h |
| Dióxido de Nitrógeno, NO ₂ | 53 ppb | Anual |
| | 100 ppb | 1 h |

Anexo No. 5. Límites de Calidad del Aire de la EPA

Fuente: Código de regulación federal, Título 40: Protección del Ambiente,
Agencia de Protección Ambiental, EEUU