



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN EL AIRE ENTRE BAGAZO
DE CAÑA DE AZÚCAR Y CARBÓN CUANDO SE UTILIZA COMO
COMBUSTIBLE EN LA CALDERA DE LA UNIDAD DE NEGOCIO DE
GENERACIÓN O COGENERACIÓN DE UN INGENIO AZUCARERO**

José Andrés Lam Ceballos

Asesorado por el Ing. Byron López

Guatemala, agosto de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN EL AIRE ENTRE BAGAZO
DE CAÑA DE AZÚCAR Y CARBÓN CUANDO SE UTILIZA COMO
COMBUSTIBLE EN LA CALDERA DE LA UNIDAD DE NEGOCIO DE
GENERACIÓN O COGENERACIÓN DE UN INGENIO AZUCARERO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JOSÉ ANDRÉS LAM CEBALLOS

ASESORADO POR EL ING. BYRON LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, AGOSTO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran.
VOCAL IV	Br. Juger Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Msc. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Msc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Msc. Ing. Juan Pablo de León
SECRETARIA	Msc. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

**COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN EL AIRE ENTRE BAGAZO
DE CAÑA DE AZÚCAR Y CARBÓN CUANDO SE UTILIZA COMO
COMBUSTIBLE EN LA CALDERA DE LA UNIDAD DE NEGOCIO DE
GENERACIÓN O COGENERACIÓN DE UN INGENIO AZUCARERO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 05 de abril de 2017.

Ing. José Andrés Lam Ceballos

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darle trascendencia a todos mis actos.
Virgen María	Por siempre cuidarme y guiarme.
Mi madre	Por su ejemplo y ánimos.
Mis hermanas	Por su apoyo incondicional y por hacerme querer ser una mejor persona y ejemplo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por la oportunidad de crecer como profesional y obtener conocimientos.
Escuela de Estudios de Postgrados	Por creer en los profesionales guatemaltecos.
Mi asesor	Por su disponibilidad, consejos y correcciones.
Ingenio	Por permitirme realizar la investigación.
Mi jefe Ing. Leonel Morales	Por su comprensión y por darme la libertad en horario laboral.
Ing. Erick Castillo	Por su colaboración y apertura para darme acceso al equipo Testo y su permiso para realizar las mediciones.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS	IX
LISTA DE FÓRMULAS DE COMPUESTOS QUÍMICOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XIX
Descripción del problema	XIX
Delimitación del problema	XX
Formulación del problema	XX
OBJETIVOS	XXIII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Combustión.....	1
1.2 Combustibles	3
1.3 Gases de combustión	4

1.4	Gases de efecto invernadero (GEI)	10
1.5	Límites en las emisiones	12
1.6	Impacto ambiental en el aire	14
1.7	Técnicas de medición de gases de combustión	17
1.8	Accesorios de calderas para disminuir emisiones	20
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
2.1	Metodología.....	23
2.2	Combustible bagazo.....	26
2.3	Combustible carbón.....	34
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	45
3.1	Parámetros de medición y sus límites de emisión.....	45
3.2	Estimación de las emisiones de los parámetros elegidos	46
3.3	Comparación de emisiones entre ambos combustibles y entre sus límites de emisión.....	47
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	53
	CONCLUSIONES.....	59
	RECOMENDACIONES	61
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
	ANEXOS	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Reacciones de combustión del bagazo de caña.	17
2.	Colocación del equipo testo para la obtención de mediciones.	25
3.	Proceso de toma de muestras en la chimenea del ingenio.	25
4.	Comportamiento del porcentaje de O ₂ y CO ₂ en los gases cuando el combustible es bagazo de caña.	31
5.	Comportamiento de las ppm de CO en los gases cuando el combustible es bagazo de caña.	32
6.	Comportamiento de las ppm de NO _x en los gases cuando el combustible es bagazo de caña.	32
7.	Comportamiento del flujo de los gases cuando el combustible es bagazo de caña.	34
8.	Comportamiento del porcentaje de O ₂ y CO ₂ en los gases cuando el combustible es carbón mineral.	39
9.	Comportamiento de las ppm de CO en los gases cuando el combustible es carbón mineral.	40
10.	Comportamiento de las ppm de NO _x en los gases cuando el combustible es carbón mineral.	41

11.	Comportamiento de las ppm de SO ₂ en los gases cuando el combustible es carbón mineral.	42
12.	Comportamiento del flujo de los gases cuando el combustible es bagazo de carbón.	43
13.	Emisiones de CO ₂ cuando se quema bagazo de caña o carbón mineral y límite de emisión del gas.....	48
14.	Emisiones de CO cuando se quema bagazo de caña o carbón mineral y límite de emisión del gas.....	49
15.	Emisiones de NO _x cuando se quema bagazo de caña o carbón mineral y límite de emisión del gas.....	50
16.	Emisiones de SO ₂ cuando se quema bagazo de caña o carbón mineral y límite de emisión del gas.....	51
17.	Caldera del ingenio, punto de muestreo y precipitador electrostático	70

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Potencial de calentamiento para metano, óxido nitroso, hidrofluorocarburos, perfluorocarburos y hexafluoruro de azufre.....	9
II.	Límites de emisiones, según la OMS.....	12
III.	Límites de emisiones para plantas eléctricas de 50 MW de combustibles sólidos	13
IV.	Límites de emisiones para centrales eléctricas de 50 MW carbón.....	13
V.	Emisiones de acuerdo al tipo de actividad.	14
VI.	Emisiones por tipo de combustible.....	15
VII.	Norma para el análisis de contaminantes gaseosos	18
VIII.	Datos de gases obtenidos durante la época en que el combustible es bagazo de caña.....	27
IX.	Condiciones de operación durante las mediciones de bagazo y características del bagazo.....	29
X.	Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación para los datos de condiciones de operación cuando se quema bagazo y sus características	29
XI.	Datos de gases obtenidos durante la época en que el combustible es carbón.....	35
XII.	Condiciones de operación durante las mediciones de carbón y características del carbón.	37

XIII.	Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación para los datos de las condiciones de operación cuando se quema carbón y sus características.....	38
XIV.	Parámetros medidos y sus límites de emisiones	46
XV.	Promedio de emisión, desviación estándar y coeficiente de variación para CO ₂ , CO, NO _x y SO ₂ cuando se quema bagazo.....	47
XVI.	Promedio de emisión, desviación estándar y coeficiente de variación para CO ₂ , CO, NO _x y SO ₂ cuando se quema carbón	47
XVII.	Promedios de emisiones de los gases CO ₂ , CO, NO _x , SO ₂ cuando se quema bagazo de caña o carbón mineral y su respectivo límite de emisión	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Cp	Capacidad c
°C	Grados Celsius
g	Gramo
kg	Kilogramos
l	Litro
MW	Mega vatios
μ	Micro
min	Minutos
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviación	Significado
AMM	Administrador del Mercado Mayorista
ASTM	American Society of Testing Materials
CMT	Conditional Test Methods
DEP's	Departamentos de Estado de Protección del Medio Ambiente
EN	European Standards
EPA	Environment Protection Agency (Agencia de protección ambiental)
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
GEI	Gas(es) de efecto invernadero
ISO	International Organization for Standardization
MTAS	Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España
OMS	Organización Mundial de la Salud
ESP	Precipitador electrostático

LISTA DE FÓRMULAS DE COMPUESTOS QUÍMICOS

Fórmula	Compuesto
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
H₂	Hidrógeno
H₂O	Agua
H₂S	Sulfuro de hidrógeno
HCl	Haluro de cloro
HCN	Cianuro de hidrógeno
HF	Haluro de flúor
N₂	Nitrógeno
NH₃	Amoniaco
NO_x	Nitratos de oxígeno
O₂	Oxígeno
SO₂	Sulfuro de oxígeno

GLOSARIO

Palabra	Significado
Bagazo	Fibra que queda luego de extraerle el jugo a la caña de azúcar.
Caldera pirotubular	Caldera que lleva dentro de los tubos, la llama y gases de combustión, y afuera de los tubos, el agua y vapor.
Caldera acuatubular	Caldera que lleva dentro de los tubos agua y vapor, y fuera de ellos la llama y gases de combustión.
Caña	Planta rica en sacarosa, de tallo delgado y de hasta tres metros de altura.
Carbón	Elemento de la tabla periódica que en la naturaleza se encuentra en estado sólido y es de color negro, textura áspera, ligero y combustible.
Capacidad calorífica	Energía necesaria para elevar un grado de temperatura una sustancia.
Ebullir	Cambio del estado líquido al gaseoso de una sustancia, puede ocurrir por un incremento en la temperatura.

Emisión	Flujo de gas que es liberado al ambiente.
Estequiometria	Cálculo ideal de reactivos y productos en una reacción química.
Generadora	Empresa que genera energía eléctrica para el mercado nacional.
Hulla	Carbón mineral negro con brillo mate que procede de grandes masas de material vegetal enterrado.
Lignito	Carbón mineral negro o pardo que se usa en centrales térmicas.
Nitrofílica	Que depende de un medio alto en nitrógeno para existir.
Poder calorífico	Cantidad de energía por unidad de volumen o masa que puede ser utilizada o extraída de la sustancia.
Polución	Contaminación del ambiente producida por la actividad humana.
Potencial de calentamiento global	Efecto de calentamiento en el tiempo por liberar hoy 1 kg de un GEI en comparación con el CO ₂ .
Testo	Equipo de análisis de gases.

Zafra

Época del año en que los ingenios azucareros producen azúcar.

RESUMEN

A medida que el tiempo avanza y las poblaciones e industrias crecen, existe mayor demanda de energía. Los ingenios azucareros de Guatemala vieron la oportunidad de incursionarse en este negocio, a través de plantas de generación eléctrica por combustión de bagazo. El bagazo era un subproducto y se encontró que su poder calorífico le permitía ser quemado en calderas acuatubulares para así generar vapor para mover una turbina y con un generador eléctrico producir energía eléctrica para autoabastecerse de ella y vender el excedente al mercado guatemalteco.

Por lo tanto, los ingenios contaron con plantas generadoras, cuyo combustible era bagazo, el cual se produce en época de zafra que es de sólo 5 o 6 meses. Por lo que vieron la oportunidad de adaptar sus calderas para que puedan quemar otro combustible en época de no zafra o de reparación. Ese otro combustible elegido fue el carbón y ahora los ingenios generan en época de reparación energía, a partir de la quema de carbón.

Sin embargo, toda combustión genera gases, los cuales siempre habrá una parte, si no es que en su totalidad, que serán liberados al ambiente en el aire y hay diferencia entre quemar bagazo de caña a quemar carbón mineral. Si bien es cierto, Guatemala aún está atrasado en temas ambientales y no tiene una legislación que indique límites de emisiones al aire, no quiere decir que no exista la contaminación y que en otros países u otros organismos internacionales ya hayan determinado e incluso implementado límites en las emisiones de gases al aire.

Al realizar la medición de los gases en la chimenea de un ingenio azucarero, se obtuvieron la cantidad de emisiones y por lo tanto, se analizó y compararon las diferencias de parámetros para ambos combustibles notándose que el carbón es más contaminante. Luego al revisar y comparar con organismos internacionales se observó que los valores para CO con ambos combustibles y para CO₂ con carbón mineral están por encima de los límites. Mientras que los demás están por debajo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Descripción del problema

Los ingenios azucareros han quemado el bagazo de la caña de azúcar desde principios de los años sesenta. Esto se hace porque el bagazo es un subproducto de alto valor calorífico. Sin embargo, los últimos años las calderas de los ingenios azucareros en Guatemala han sido modificadas para quemar carbón. Este cambio de tecnología busca producir energía en la temporada de no zafra, en la que no se produce azúcar, por lo que no se muele caña, por lo tanto no se tiene bagazo.

Si bien es cierto, todo proceso industrial tiene como objetivo la transformación de materia prima en un producto de valor para la empresa; siempre se obtienen subproductos y residuos. En este caso, la materia prima es el combustible y uno de los subproductos o residuos son los gases de combustión. Los gases tienen un impacto sobre el medio en que son liberados y pueden contaminar en gran o pequeña medida. La mayor parte de los gases son de efecto invernadero, por lo que están causando el aumento en la temperatura del planeta y el cambio climático.

Por lo tanto, el problema es que no se tiene una idea del impacto ambiental que genera el cambio de tecnología por parte de los ingenios azucareros, por ende, esta investigación busca realizar un estudio de impacto ambiental sobre las emisiones al aire que ahora genera la caldera que fue

modificada en un ingenio azucarero de la costa para determinar la contaminación resultante.

Delimitación del problema

Se hizo una medición diaria alrededor de las 7 de la mañana. Las mediciones se realizaron en un ingenio azucarero del departamento de Suchitepéquez, entre los meses de abril y julio del 2016. Este ingenio cuenta con una sola caldera adaptada para la quema de carbón, por lo que sólo en ésta se hicieron mediciones y todas se hicieron con el equipo Testo 340 en la chimenea.

Formulación del problema

Esta investigación se desarrolló a partir de preguntas, las cuales se presentan a continuación:

Pregunta central:

¿Cuál es la diferencia en parámetros de impacto ambiental en el aire, debido a la quema de bagazo de caña versus la quema de carbón mineral en una caldera modificada de un ingenio azucarero?

Preguntas auxiliares:

1. ¿Cuáles son los parámetros y sus indicadores respecto a impacto ambiental en emisiones al aire?
2. ¿Cuáles serán las emisiones de la caldera, utilizando como combustible bagazo de caña y carbón mineral?
3. ¿Cuál de los combustibles genera mayor polución al aire respecto a los términos de referencia de impacto ambiental?

Para darle respuesta a la pregunta central, se requiere primero responder las auxiliares. Respondiendo a las tres preguntas auxiliares, se logrará tener fundamentos para responder la central y así concluir la investigación.

OBJETIVOS

General

Comparar el impacto ambiental en el aire, generado por el uso de bagazo y carbón mineral en la caldera de la unidad de negocio de generación o cogeneración de un ingenio azucarero.

Específicos

1. Determinar los parámetros que se medirán y la cantidad de emisiones permitidas de cada uno.
2. Medir las emisiones de los parámetros elegidos cuando se quema bagazo de caña y quema carbón mineral.
3. Comparar las emisiones entre ambos combustibles y entre los parámetros de emisiones al aire.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El tipo de investigación que se realizó es cuantitativo descriptivo. Ya que se basó en la realización de mediciones de composición de gases en los gases de chimenea que son liberados al aire.

Para la realización de la investigación, se tomaron mediciones o análisis de gases de combustión en la chimenea de la caldera de unidad de negocio de cogeneración o generación de un ingenio azucarero cuando ésta estuviera utilizando cada uno de los dos combustibles que se plantearon. Para la toma de datos, se utilizó el equipo Testo 340, el cual es un analizador de gases y se utiliza en el ingenio para medir las eficiencias de todas las calderas. Para fines de la investigación, el equipo Testo 340 fue utilizado para medir composición de gases en la salida de la chimenea. Este equipo proporciona datos de flujo, temperatura y porcentaje de CO₂, así como ppm de CO, NO_x y SO₂.

En un ingenio existe la época de zafra y la época de reparación. En la época de zafra se está cosechando la caña y se extrae el azúcar, por lo que hay bagazo y éste es el combustible que se utiliza en la caldera. Cuando no es zafra se utiliza carbón como combustible. Por lo tanto, la toma de muestras se realizó en dos partes: la primera en el mes de abril cuando es zafra, y la segunda durante el mes de junio, que es cuando se utiliza carbón.

El procedimiento de muestreo para ambas etapas de la toma de datos fue el mismo. Como se mencionó anteriormente, el equipo que se utilizó fue el Testo 340. El procedimiento que se llevó a cabo consta de dos partes: la primera es

tomar una medición del ambiente, y la segunda es poner la punta de la pistola del equipo en contacto con los gases y realizar el análisis.

Con las mediciones hechas, se realizó la tabulación de los datos. A partir de las tablas de los datos, se realizaron análisis estadísticos y gráficos para cada uno de los parámetros de las mediciones, así observar las tendencias. Luego se realizaron las comparaciones para ubicar cada parámetro dentro de las regulaciones internacionales. Después se calculó el equivalente en CO₂ para cada uno de los gases analizados; luego se compraron ambos períodos, cuando el combustible es bagazo y cuando es carbón, para determinar y concluir cuál combustible es más contaminante en el aire.

INTRODUCCIÓN

Los ingenios azucareros han transformado sus calderas para usarlas cuando el combustible bagazo de caña se escasee, ya que sólo se genera en época de zafra. Lo que se requería entonces era quemar otro combustible. El combustible elegido fue carbón mineral, por lo que en época de reparación se podría decir que el ingenio se vuelve en una generadora, a partir de carbón o carbonera.

El principio de la generación eléctrica en los ingenios es la evaporación de agua en calderas acuatubulares para generar vapor, el cual hace girar la turbina que está acoplada a un generador eléctrico. Para evaporar el agua se necesita generar calor, lo cual se hace quemando el bagazo o el carbón. Al ser la combustión la manera de obtener la energía se obtendrán gases de combustión que son liberados al ambiente, a través de la chimenea de la caldera. Estos gases son productos que siempre van a existir, pero pueden catalogarse como dañinos para el medio ambiente y la salud.

En el capítulo uno de esta investigación, se define los términos de combustión, así como los combustibles que son utilizados y toda la posibilidad de gases que pueden ser generados por esta actividad y se clasifican los de efecto invernadero. Al final del capítulo, en las secciones 1.5 y 1.6 se definen los límites de emisiones de acuerdo a los utilizados por organismos internacionales, en este caso de La Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés). Estas son las bases y parámetros que servirán para lograr los objetivos de la investigación.

El capítulo dos se divide en cuatro partes. En la primera, se explica cómo fue el proceso de toma de datos, el procedimiento realizado y las condiciones en que se midió.

En la segunda, se encuentran los datos de emisiones tomados de la caldera del ingenio azucarero, utilizando el equipo Testo de los gases de interés para la época en que se utiliza bagazo y las gráficas de estos datos, para su análisis visual rápido.

La tercera sección de este capítulo tiene el mismo contenido que la uno, pero referente al carbón mineral y todos los datos fueron tomados de igual manera con el equipo Testo durante la época de reparación.

En la cuarta parte del capítulo dos se realizan las conversiones necesarias poder comparar los datos obtenidos de las mediciones con los límites que para esas emisiones.

En el capítulo tres se muestran los resultados, en esta sección se presentan gráficos para comparar visualmente qué combustible es el que resulta más contaminante o que tienen más emisiones al ambiente y también observar el límite de emisiones y así observar si se logra estar por debajo o qué tan lejos se está de lograrlo.

En el capítulo cuatro, se discute sobre algunos motivos de por qué se llegaron a esos resultados, las variables que influyeron y la manera en que lo hicieron. Y finalmente, conclusiones y recomendaciones de la investigación.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Combustión

La combustión es un proceso químico en el que una sustancia reacciona rápidamente con oxígeno y libera calor. La sustancia que reacciona con el oxígeno se llama combustible y puede estar en estado sólido, líquido o gaseoso y la fuente de oxígeno es el oxidante que por lo general es el aire (Hall, 2011).

Existen varios tipos de combustión:

Lenta: este tipo de combustión se caracteriza por emitir poca luz, pero generar mucho calor. Esta se produce en un medio en el que hay poca ventilación, es decir, poco oxígeno y que hay muy poca presencia de combustible. También suele ocurrir cuando el combustible es muy denso. El fuego generado es de gran peligro, porque es generado en espacios con poco oxígeno, por lo que al abrir una puerta de aire la reacción se torna mucho más violenta. (Isabelle, 2016).

Rápida: este tipo de combustión son aquellas que emiten mucha luz y calor dando como resultado un fuego intenso. En una combustión rápida se dan varias explosiones que son conocidas como combustiones instantáneas. Hay dos tipos de explosiones: Explosiones por detonación: la cual es una combustión de mucha velocidad, tanto que la velocidad de propagación de la llama llega a superar la del sonido. Explosiones de deflagración: es la misma descripción que una explosión por detonación, pero la velocidad de la llama no llega a la del sonido. (Isabelle, 2016).

Completa: en una combustión completa el combustible o sustancias combustibles se queman a niveles por encima de su oxidación. En una combustión completa, los gases emitidos son incoloros, por lo que no se ven humos. Para lograr que todos los elementos del combustible lleguen a oxidarse de manera completa y se genere dióxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, se debe tener un gran control en la temperatura, presión y la cantidad de oxígeno en la reacción (Isabelle, 2016).

Incompleta: es una combustión incompleta aquella en la que no se oxidan por completo los combustibles, por lo que en los gases de combustión se encuentran sustancias combustibles, por ende, se pueden observar humos. A estos residuos de combustible se les llama inquemados, algunos ejemplos son el carbono como el hollín, H_2 , CO , hidrocarburos en pocas cantidades, etc. Si la combustión genera CO en los gases de combustión, se le llama combustión de Ostwald, pero si producen CO y H_2 , se le llama Combustión de Kissel. Estas combustiones son muy peligrosas, ya que el monóxido de carbono es un gas venenoso, incoloro e inodoro y cuando no hay ventilación suficiente este será respirado por seres humanos, lo cual afectará rápidamente la salud de la persona, ya que da lugar a una carboxihemoglobina que ocurre porque el CO compite con el O_2 en la sangre. Estas ocurren porque no existe una óptima relación entre el combustible y el oxígeno, o no hay una correcta distribución del aire. (Isabelle, 2016).

Normal: la combustión normal también es llamada estequiométrica. Esta se completa con la menor cantidad de aire y teóricamente no se generan humos. Genera calor y luz que es perceptible, como por ejemplo, el efecto de quemar una hoja de papel. (Isabelle, 2016).

Con exceso de aire: como su nombre lo indica esta combustión se da cuando la cantidad de aire es mayor a la estequiométrica. Como tiene más oxígeno del necesario este pasa de largo y se puede hallar en los gases de

combustión. En esta tipo se encuentran residuos de combustibles en los gases de combustión (Isabelle, 2016).

1.2. Combustibles

El bagazo de caña es el residuo que se obtiene luego de triturar y comprimir la caña en los molinos cañeros. En cuanto a su apariencia es un material fibroso, de densidad baja y alto contenido de humedad. Su composición es 0.5 de humedad, 0.05 de sólidos solubles y 0.45 de sólidos insolubles y su composición química es 0.47 de carbono, 0.065 de hidrógeno, 0.44 de oxígeno y 0.025 de cenizas aproximadamente, ya que su composición varía de acuerdo al suelo, el tipo de caña y el clima (Hugot, 1994).

El carbón mineral es una roca sedimentaria que fue formada al existir acumulación de restos vegetales en áreas con mucha agua estancada. Es por esto que el carbón llamado mineral al final también es combustible de biomasa. Es un combustible fósil, que está compuesto casi exclusivamente de carbono y se encuentra en distintas tonalidades de negro. Es el combustible fósil que más se tiene en la Tierra, pero la mayor parte es muy difícil de extraer. Existen varios tipos que se clasifican de acuerdo a su contenido de carbón. La turba tiene 55 %, el lignito de 60 % a 75 %, la hulla de 75% al 85% y la antracita que llega hasta el 95 % de carbón y por lo tanto, es el que tiene el mayor poder calorífico (Vian, 2006).

Una caldera es un equipo generador de vapor, gracias a la combustión de algún combustible, la caldera calienta agua para convertirla en vapor. Existen dos tipos, las acuatubulares y las pirotubulares. Las acuatubulares llevan el agua

en los tubos mientras que las pirotubulares llevan la energía y la llama de la combustión en los tubos. Otra diferencia es que las pirotubulares son de mayor capacidad y pueden llegar a generar vapor sobrecalentado. Los ingenios utilizan calderas acuatubulares (Rein, 2013).

1.3. Gases de combustión

Los gases de combustión son aquellos que se generan en una combustión, si se pone el ejemplo de auto que quema gasolina, los gases de combustión son los gases de escape. La composición química depende del tipo y calidad de combustible y de las condiciones, como temperatura, presión, cantidad de oxígeno, etc. Y la composición física depende de la química. La mayoría de los gases de combustión tienen contaminantes del aire, por ello es que se realizan procesos lentos y costoso para eliminarlos de los gases de combustión antes que éstos sean liberados a la atmosfera. Estos procedimientos se realizan porque la composición de los gases está normada. Un gas de combustión sin tratamiento es llamado gas bruto y luego del tratamiento se le llama gas limpio A continuación se explican los principales componentes de los gases de combustión (Baird, 2004).

Nitrógeno (N₂):

Gas incoloro, inodoro e insípido. Entra a la combustión con el aire y por lo general vuelve a salir en los gases de combustión sin ser partícipe de la reacción. Pero en ocasiones, el nitrógeno del aire junto con el nitrógeno del combustible contribuyen a generar óxidos de nitrógeno (Baird, 2004).

Dióxido de carbono (CO₂):

El dióxido de carbono es un gas incoloro e insípido y se genera en todos los procesos de combustión, exceptuando la combustión de hidrógeno. Es el principal gas de efecto invernadero. (Baird, 2004).

Vapor de agua (H₂O):

Este es un gas que se forma cuando el combustible contiene hidrógeno. El agua aparece como vapor o como condensado dependiendo de la temperatura de los gases de combustión, si es alta aparece como vapor junto a los gases y si es baja aparece como condensado. (Baird, 2004).

Sustancias sólidas (polvo, hollín):

Cuando los gases de combustión se ven negros como en el humo y el smog es porque llevan pequeños sólidos. Éstos son combustible que no se quemó y son óxidos de calcio, aluminio, silicio, etc. La exposición a estos sólidos es peligrosa para la salud respiratoria de las personas. (Baird, 2004).

Oxígeno (O₂):

El oxígeno aparece en los gases de combustión cuando hay exceso de aire. La cantidad de oxígeno es un indicador de la eficiencia de la combustión (Baird, 2004).

Monóxido de carbono (CO):

Gas incoloro e inodoro. Es un indicador de una combustión incompleta, cuando no hay buena combustión se presenta en mayores concentraciones. Es un gas tóxico (Baird, 2004).

Óxidos de nitrógeno (NO_x):

Estos son generados cuando el nitrógeno del combustible y el oxígeno del aire se unen durante una combustión a temperatura elevada (Baird, 2004).

Dióxido de azufre (SO₂):

El dióxido de azufre es un gas incoloro, tóxico con un olor. Se produce por la oxidación del azufre que está en el combustible. Cuando se combina con agua condensada se forma ácido sulfuroso y sulfúrico, los cuales son dañinos para el medio ambiente, ya que son responsables de la lluvia ácida que deteriora las vegetaciones y edificios (Baird, 2004).

Sulfuro de hidrógeno (H₂S):

El sulfuro de hidrógeno es un gas tóxico que a bajas concentraciones huele a huevo podrido. Este gas se encuentra en el gas natural y el petróleo, por lo tanto, se tiene en refinerías y procesadoras de gas natural, pero también está presente o se origina en actividades agrícolas y de ganado (Baird, 2004).

Hidrocarburos (HC o C_xH_y):

Los hidrocarburos son compuestos formados por carbono e hidrógeno y son gaseosos los que en su estructura química tienen pocos carbonos. En ocasiones también tienen otros elementos como O, N, Cl, o F. Se encuentran en los combustibles fósiles. El metano CH_4 , que es el hidrocarburo más pequeño, es un gas de efecto invernadero venenoso para el ser humano (Baird, 2004).

Cianuro de hidrógeno (HCN):

El cianuro de es un líquido extremadamente venenoso que ebulle a $25.6^\circ C$, la cual es una temperatura mucho más baja que la de las combustiones; por lo tanto, es un producto gaseoso en la reacción (Baird, 2004).

Amoníaco (NH_3):

Este gas es un gas incoloro de olor característico. Irrita los ojos y la nariz y es dañino para la salud. Se genera con combustibles que tienen nitrógeno como telas y algunos polímeros (Baird, 2004).

Haluros de hidrógeno:

Son compuestos por hidrógeno y un elemento halógeno. En combustión se dan principalmente haluro de cloro (HCl) y de flúor (HF). Se producen cuando se queman sustancias residuales húmedas o carbón húmedo (Baird, 2004).

Los gases de efecto invernadero (GEI) son vapor de agua que es generado por la evaporación de los cuerpos de agua. Dióxido de carbono, que representa el 70 % de los GEI, es generado por la combustión de combustibles fósiles. Metano, representa el 24 %, se produce en gran parte por el tratamiento de aguas residuales, al excremento de ganados, emisiones de gases de pantanos e incineradoras de residuos. Óxido nitroso que representa el 6 %, principalmente generado por aerosoles. Hidrocarburos que son producidos por el uso de polifluorocarbonos en refrigeración y aires acondicionados (Inspiration, 2016).

El Potencial de Calentamiento Global define el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación instantánea de 1 kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO₂. De esta forma, se pueden tener en cuenta los efectos radiactivos de cada gas, así como sus diferentes períodos de permanencia en la atmósfera (OCCC, 2011).

Tabla I. **Potencial de calentamiento para metano, óxido nitroso, hidrofluorocarburos, perfluorocarburos y hexafluoruro de azufre**

GAS	FÓRMULA	POTENCIAL DE CALENTAMIENTO IPCC
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	21
Óxido nitroso	N ₂ O	310
HIDROFLUOROCARBUROS		
HFC-23	CHF ₃	11700
HFC-32	CH ₂ F ₂	650
HFC-41	CH ₃ F	150
HFC-43-10mee	C ₅ H ₂ F ₁₀	1300
HFC-125	C ₂ H ₅ F	2800
HFC-134	C ₂ H ₂ F ₄ (CHF ₂ CHF ₂)	1000
HFC-134a	C ₂ H ₂ F ₄ (CH ₂ FCF ₃)	1300
HFC-152a	C ₂ H ₄ F ₂ (CH ₃ CHF ₂)	140
HFC-143	C ₂ H ₃ F ₃ (CHF ₂ CH ₂ F)	300
HFC-143a	C ₂ H ₃ F ₃ (CF ₃ CH ₃)	3800
HFC-227ea	C ₃ H ₇ F	2900
HFC-236fa	C ₃ H ₂ F ₆	6300
HFC-245ca	C ₃ H ₃ F ₅	560
PERFLUOROCARBUROS		
Perfluorometano	CF ₄	6500
Perfluoroetano	C ₂ F ₆	9200
Perfluoropropano	C ₃ F ₈	7000
Perfluorobutano	C ₄ F ₁₀	7000
Perfluorociclobutano	c-C ₄ F ₈	8700
Perfluoropentano	C ₅ F ₁₂	7500
Perfluorohexano	C ₆ F ₁₄	7400
HEXAFLUORURO DE AZUFRE	SF ₆	23900

Fuente: Oficina Catalana del Cambio Climático, 2011.

Un estudio de impacto ambiental es el que se utiliza para referir todos los “informes, estudios, investigaciones y pruebas que se realicen en determinado sector, lugar, proceso, etc., ante los resultados que una transformación en el

medio ambiente puede generar” (Rivera, 2009). Estos estudios son legalmente obligatorios y necesarios cuando de alguna manera se va a hacer un cambio en el ambiente natural, como cambio de paisaje, emisiones, ruidos, emisión de luz, extracción de petróleo, construcción, cambio de químicos para un proceso, cambio de tecnología de producción o de análisis, etc.; ayudan a determinar la consecuencias negativas y positivas en el ambiente. En ocasiones se hacen, a partir de denuncias o demandas de personas que se ven afectadas de alguna manera por el cambio en el medio natural o por instituciones que velan por la protección de los recursos naturales. (Rivera, R. 2009).

1.4. Gases de efecto invernadero (GEI)

Actualmente son seis los considerados gases de efecto invernadero, estos son los que retienen energía que llega al planeta, a través de los rayos solares. Al retener la energía dentro del planeta se ocasiona el efecto invernadero con el que la temperatura del planeta aumenta.

Vapor de agua (H₂O):

Es el gas de efecto invernadero natural. Se obtiene de la evaporación de cuerpos de agua como lagos, ríos y mares (Kelly, 1996).

Dióxido de carbono (CO₂):

Así como el agua es considerada el GEI natural, el CO₂ es considerado el artificial o el principal generado por el ser humano. Su origen es la quema de

combustibles fósiles y biomasa. Aunque también se genera por erupciones volcánicas (Kelly, 1996).

Metano (CH₄):

Este gas se origina por venteo de gas natural y por la descomposición anaeróbica de material orgánico, generalmente en áreas húmedas como pantanos. También es liberado al ambiente por procesos enzimáticos que suceden en las heces de los animales (Kelly, 1996).

Óxido nitroso (N₂O):

Este es generado por el uso de fertilizantes nitrogenados en la agroindustria y por la combustión de carburantes (Kelly, 1996).

Ozono (O₃):

Éste se encuentra de manera en la atmósfera terrestre, específicamente en la tropósfera (Kelly, 1996) y estratósfera (Bergman, 2014).

Gases florados:

Son los únicos que no se producen de alguna forma natural. Fueron desarrollados por el ser humano para fines industriales. Específicamente refrigeración y aires acondicionados (Kelly, 1996).

1.5. Límites en las emisiones

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha publicado límites de emisiones de gases para garantizar la salud de las personas en interiores. Los cuales son:

Tabla II. **Límites de emisiones según la OMS**

Gas	Emisión
CO	0.59 g/min
NO _x	200 µg/m ³
SO ₂	500 µg/m ³
CO ₂	1000 ppm

Fuente: OMS, 2017.

Para el Ministerio de Trabajo y Asuntos sociales de España (MTAS) el límite en emisiones de CO₂ 5,000 ppm (Domínguez, 2000).

Los límites planteados por la OMS y el MTAS se refieren más a climas laborales o a calidades de aire dentro de espacios cerrados, por lo que los valores límites son muy pequeños.

Para el caso del ingenio es más conveniente utilizar límites de emisiones de industrias generadoras. Éstos pueden ser encontrados en la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), los Departamentos de Estado de Protección del Medio Ambiente (DEP's) si existiese en el país de interés. A

continuación, se presentan los límites para los tipos de industrias aplicables o similares al ingenio azucarero.

Tabla III. Límites de emisiones para plantas eléctricas de 50 MW de combustibles sólidos

Componente medido	Valores límite
CO	250 mg/m ³
NO _x	400 mg/m ³
SO ₂	400 mg/m ³

Fuente: Jecht, 2012.

Para el bagazo valores de emisión de CO₂ entre 13% y 20% representan una buena combustión (Muñoz, 2015).

Tabla IV. Límites de emisiones para centrales eléctricas de 50 MW carbón

Componente medido	Valores límite
CO ₂	18%
CO	250 mg/m ³
NO _x	200 mg/m ³
SO ₂	400 mg/m ³

Fuente: Jecht, 2012.

1.6. Impacto ambiental en el aire

El ingenio funciona como una planta en la que se genera energía eléctrica, a partir de la combustión de combustibles fósiles. De acuerdo al tipo de actividad, así será el tipo de gas que se generará y que se liberará a la atmósfera.

Tabla V. **Emisiones de acuerdo al tipo de actividad**

Actividad o fuente	Principales componentes de emisión
Emisiones de generación eléctrica	NO _x , SO ₂
Emisiones de combustión de tráfico vehicular	NO _x , SO ₂
Emisiones de polvo de caminos	Partículas
Emisiones de manejo de materiales	Partículas
Emisiones de elaboración hormigones	Partículas

Fuente: Universidad de Oviedo, 2012.

Tabla VI. **Emisiones por tipo de combustible**

Combustible	Gas emitido
Carbón	CO ₂ , CO, H ₂ O, SO ₂ , N ₂ , O ₂
Gas Natural	SO ₂ , CO ₂ , NO _x , CH ₄
Gasolina	CO ₂ , CO, NO _x , HC, SO ₂ , H ₂ O
Diesel	CO ₂ , CO, NO _x , HC, SO ₂ , H ₂ O
Biomasa	CO ₂ , CO, N ₂ , NO _x , CH ₄ , HC, H ₂ O

Fuente: Cook, 2012.

Las carboneras son industrias contaminantes principalmente en emisiones de CO₂, NO_x y SO₂, que son los principales precursores de deposiciones, ozono troposférico y lluvias ácidas (ENDESA, 2006). La deposición es cuando el compuesto, en este caso, carbono, nitrógeno o azufre, es transferida de la atmósfera a los suelos y aguas contaminándolas (Gillenwater, 2006). Los efectos de la deposición son la saturación del compuesto en el suelo, lo que lleva a formar sales que son solubles y transportables cuando hay precipitación. Un suelo saturado de nitrógeno cambia la capacidad metabólica de las comunidades microbianas del sitio, esto deriva en disminución de cationes de potasio o magnesio, además disminuye el pH y esto reduce la fertilidad del suelo. En la vegetación existente, las plantas que son nitrofilicas pronto tomarán el lugar de las que no lo son, lo que reduce la biodiversidad. Los insectos también son afectados por la reducción de biodiversidad de flora y el aumento de nitrógeno en la biomasa de la que se alimentan, los lleva a desplazarse o adaptarse (Ochoa-Hueso, 2017).

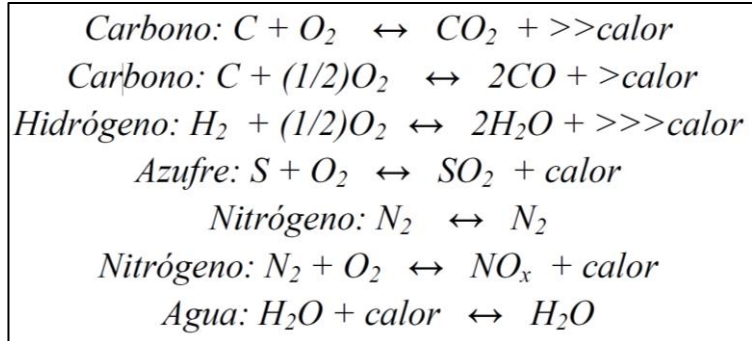
El ozono troposférico es el que se encuentra en la tropósfera, decir la capa de aire más cercana a la superficie terrestre, de 10 a 18 km. Éste representa el

10% del ozono total y es el encargado de la absorción de la radiación ultravioleta, por lo que su disminución es un riesgo para la biosfera y para los seres humanos. Además de estar directamente relacionado con la temperatura del ambiente. Si las concentraciones aumentan también es perjudicial, ya que las cantidades altas de ozono están relacionadas con problemas respiratorios como asma, bronquitis y fibrosis pulmonar (Guerra, 2003).

La lluvia ácida está compuesta gran parte por ácido sulfúrico y ácido nítrico, que provienen entre otros de dióxido de azufre y de nitratos que son emitidos a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas. Las lluvias ácidas pueden viajar por el viento cientos de kilómetros y así afectar zonas que no están cerca de las fuentes de emisión. El ácido puede dañar los tejidos de las plantas. Al caer sobre el suelo se neutraliza con el calcio del suelo, al ya no haber calcio se acumula en la tierra, lo cual libera aluminio que es tóxico para plantas y animales (Brown, 2000).

Cuando se quema algún combustible éste genera productos de acuerdo a su composición y las reacciones químicas que conlleva. Para el bagazo de caña, las reacciones por combustión se presentan a continuación.

Figura 1. **Reacciones de combustión del bagazo de caña**



Fuente: Muñoz, 2015.

1.7. Técnicas de medición de gases de combustión

Para la medición de gases de combustión existen varias técnicas o métodos que deben ser utilizados para garantizar que la medición sea aceptada por organismos auditores o internacionales. Son tres métodos los que existen. El primero es el CMT 034, que fue publicado por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) en 2005. CMT o Conditional Test Methods son un conjunto de ensayos que describen el uso de los equipos de acuerdo a su tecnología para mediciones específicas. Este método se utiliza para la determinación de óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), oxígeno y sulfuros (SO_2) (Academia Testo, 2010).

Tabla VII. **Norma para el análisis de contaminantes gaseosos**

Compuesto	Muestreo	Norma	Análisis
SO ₂	Celda electroquímica	CTM-034	Medición directa
CO	Celda electroquímica	CTM-034	Medición directa
CO ₂	Celda electroquímica	CTM-034	Medición directa
NO _x	Celda electroquímica	CTM-034	Medición directa

Fuente: Academia Testo, 2010.

El segundo es el método ASTM D-6522 que fue publicado en el “Annual Book of ASTM Standards”. ASTM por sus siglas en inglés (American Society of Testing Materials) es una entidad internacional que desarrolla y publica técnicas para el análisis de materiales, productos, sistemas y servicios. Este método es para la determinación de concentraciones de NO_x, CO y O₂ en emisiones en calderas y quemadores de proceso (ASTM, 2018).

El tercero es llamado métodos de referencia. En estos se utiliza técnicas aprobadas por los Estándares Europeos (EN por sus siglas en inglés). A continuación, se presentan los métodos para los gases de combustión (EU, 2018).

Oxígeno - EN 14789

Se envía una muestra fresca y seca a un analizador paramagnético, mediante un analizador de PdC Horiba, método rápido y eficaz para medir niveles de oxígeno, y validado para muestreos de 30 minutos en el rango de 5 a 26%. Los resultados en O₂ se ajustan al oxígeno de referencia y se muestran como mg/Nm³ (EU, 2018).

Monóxido de carbono – EN 15058

Se envía una muestra fresca y seca a un analizador por medición directa de infrarrojos (NDIR) no dispersivo mediante un analizador de PdC Horiba. Los resultados en CO se ajustan a la referencia y se muestran como mg/Nm³. Este método se ha validado para concentraciones de CO en muestreos de 30 minutos en el rango de 0 mg/Nm³ a 400 mg/Nm³ para grandes plantas de combustión de 0 a 740 mg/Nm³ de incineración y residuos (EU, 2018).

Óxidos de nitrógeno – EN 14792

Este método se realiza mediante quimiluminiscencia usando un analizador de PdC Horiba. La columna de gas se enfría y se seca antes de que pase por el analizador. Los resultados en NO_x se ajustan al oxígeno de referencia y se muestran como mg/Nm³. Este método se usa, tanto para rangos altos como bajos de concentraciones de NO_x, calibrado mediante gases patrón UKAS trazables de referencia (EU, 2018).

Dióxido de sulfuro – EN 14791

Se toma una muestra representativa mezclada con una solución diluida de peróxido de hidrógeno. Tras el muestreo, la solución se analiza por cromatografía de iones para sulfato (SO₄) y se ajusta al dióxido de sulfuro (SO₂) (EU, 2018).

Las normas ISO (International Organization for Standardization por sus siglas en inglés) 14,000 son las referentes a gestión ambiental. Entre este conjunto de

normas se describen a continuación las relacionadas a gases y su medición (ISO, 2018).

- ISO 14064: Especificaciones para cuantificar, monitorear e informar sobre emisiones de gases de efecto invernadero.
- ISO 14065: Requerimientos y principios para órganos acreditados para la validación y verificación de gases de efecto invernadero.
- ISO 14066: Especifica los requisitos de competencias para equipos de validación y verificación de gases de efecto invernadero, incluyendo guías para su evaluación.
- ISO 14067: Norma sobre el cálculo de la huella de carbono en producto.
- ISO 14069: Guía para la cuantificación e informe de emisiones de gases de efecto invernadero de organizaciones.

(ISO, 218)

1.8. Accesorios de calderas para disminuir emisiones

Los gases de la combustión no pueden evitarse, pero si es posible disminuir la emisión de estos al aire. A continuación, se presentan algunas tecnologías que son utilizadas en la industria y que ayudan a disminuir la emisión de gases al medio ambiente.

Precipitadores electroestáticos

Conocidos como ESP por sus siglas en inglés (Electrostatic precipitator) son dispositivos de control de partículas que utilizan fuerzas eléctricas para retener iones gaseosos. Se hace pasar el gas por una red de palcas cargadas

eléctricamente, al interactuar las partículas con las placas eléctricas, éstas son retenidas y recolectadas. Debe tomarse en cuenta que también deben ser removidas para evitar que pasen nuevamente al flujo de gas y caídas de presión. Esto se logra con otra salida, generalmente una o varias tolvas de recolección. En algunos casos se usan lavados con agua intermitente o continua (Turner, 1999).

Scrubber o lavador de gas:

Este tipo de equipo se coloca generalmente en la chimenea de las calderas. Consiste en boquillas por las que sale agua, creando una cortina por la que pasan los gases de combustión. El agua “lava” los gases y retiene a los que son solubles en agua y al material particulado (Turner, 1999).

Depuradores:

Con esta tecnología se conduce el gas por tubería y se hace llegar a un ciclón diseñado específicamente para el flujo y el tipo de gases que se desean remover (Turner, 1999).

Filtros de carbón activado:

El carbón activado es un material de mucha área superficial y muy poroso. El principio en el que se basa esta opción es la adsorción de los gases por parte del carbón activado. Una vez saturado el filtro es necesario un cambio o limpieza del mismo para que siga haciendo la labor deseada (Turner, 1999).

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Metodología

Toda investigación busca alcanzar su objetivo general propuesto. Y para ello se respalda en lograr objetivos específicos. En esta investigación no es la excepción y cada paso del desarrollo busca completar cada uno de los objetivos específicos. Siendo así, se inició por la revisión bibliográfica para determinar los parámetros que se medirán y la cantidad de emisiones permitidas de cada uno.

Para encontrar los parámetros, primero fue necesario conocer la composición de los combustibles y los posibles gases que son liberados al ambiente tras su combustión. Luego se buscó por tipo de combustible y por tipo de actividad los principales gases contaminantes generados.

Para los límites se comenzó por buscar en organismos internacionales, ya que en Guatemala no hay ningún reglamento o ley que limite las emisiones. El primer organismo fue la OMS, pero este organismo vela por la salud de las personas, por lo que los límites están relacionados a interacciones directas. Se continuó buscando límites en la EPA y se encontraron límites de los gases elegidos para carboneras y estaciones de combustión de biomasa, que son justamente los dos combustibles de los que se trata la investigación.

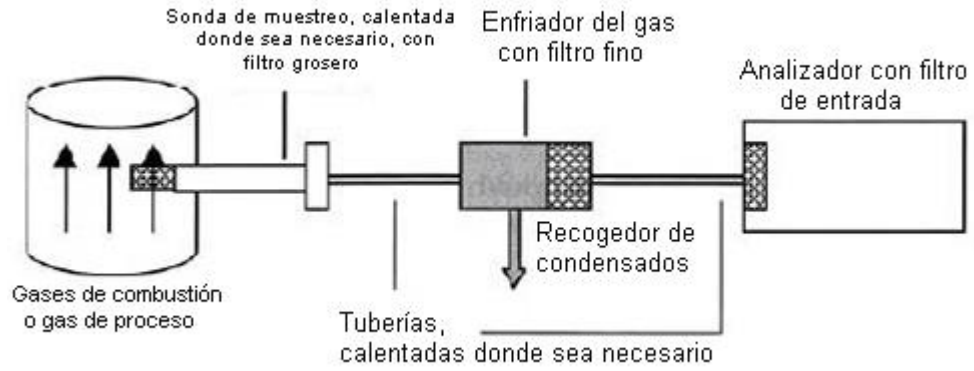
Ya habiendo determinado los gases de interés y sus límites, se continuó por medir las emisiones cuando se quema bagazo de caña y cuando se quema carbón mineral. Las mediciones en bagazo se hicieron en un ingenio del departamento de Suchitepéquez, al final del período de zafra, desde abril hasta

que terminó en mayo y las mediciones de carbón se hicieron desde que terminó la zafra en mayo hasta julio. Todas las mediciones se realizaron alrededor de las 7 de la mañana en la parte alta de la chimenea, porque es en ese punto donde los gases están prontos a ser liberados a la atmósfera.

La cantidad de análisis se debe al momento en que se inició, que fue el 11 de abril del 2016 y se terminó el 8 de mayo del mismo año, para el bagazo de caña. En esa fecha se finalizó, porque el ingenio dejó de moler. También se realizó un análisis diario lo que dio un total de 27. Para el carbón se buscó tener la misma cantidad de análisis. La realización del análisis para los gases de combustión cuando se quema carbón se llevó a cabo desde el 18 de mayo hasta el 2 de julio. Este es un período más prolongado, debido a que el ingenio está sujeto a que el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) solicite generar o no generar; por lo tanto, hubo días que no se estaba generando y esto ocasiona más días para obtener la misma cantidad de análisis.

Los análisis para ambas situaciones se realizaron con el mismo equipo. El equipo es el Testo 340, que es utilizado en el ingenio para medir eficiencias de calderas, pero que mide las concentraciones de los gases que fueron determinados para el estudio. Este equipo realiza la medición al introducir la sonda dentro de la chimenea como se muestra en las figuras 2 y 3.

Figura 2. Colocación del equipo testo para la obtención de mediciones



Fuente: Academia Testo, 2010.

Figura 3. Proceso de toma de muestras en la chimenea del ingenio



Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, esto quiere decir que todas las mañanas se subió a la chimenea de la caldera, se tomó muestra del medio ambiente, se removió la tapa para insertar la sonda de medición, se realizó la medición, se colocó la tapadera y se bajó de la chimenea.

Luego de tener todos los datos, se procedió a comparar las emisiones entre ambos combustibles y entre los parámetros de emisiones al aire. Para ello se graficaron todos los datos y se calcularon promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación y así se comparó el impacto ambiental en el aire, generado por el uso de bagazo y carbón mineral.

2.2. Combustible bagazo

En la tabla VIII, se presentan todos los datos obtenidos de todas las mediciones de los 27 días en que se tomaron, todos durante la época de zafra, es decir, cuando se quema bagazo.

Tabla VIII. Datos de gases obtenidos durante la época en que el combustible es bagazo de caña

No de medición	% O ₂	% CO ₂	ppm CO	ppm NO _x	ppm SO ₂	Flujo (l/min)
1	8.63	11.25	959	92	0	0.75
2	8.53	11.36	703	81	0	0.76
3	8.87	11.04	756	93	0	0.76
4	8.78	11.13	715	93	0	0.76
5	8.6	11.30	613	108	0	0.74
6	8.58	11.32	593	110	0	0.75
7	8.48	11.41	629	112	0	0.75
8	8.59	11.30	743	109	0	0.72
9	8.7	11.20	653	109	0	0.72
10	8.95	10.98	530	112	0	0.72
11	7.88	11.90	1506	104	0	0.72
12	8.77	11.13	814	102	0	0.74
13	8.92	10.98	1003	104	0	0.73
14	8.8	11.10	916	106	0	0.72
15	8.03	11.77	1379	97	0	0.72
16	9.18	10.76	676	91	0	0.73
17	8.69	11.20	895	91	0	0.72
18	8.53	11.32	1258	89	0	0.71
19	9.62	10.38	459	120	0	0.72
20	9.04	10.90	538	122	0	0.68
21	8.95	10.99	417	126	0	0.7
22	13.55	18.14	349	99	0	0.72
23	15.61	4.910	347	101	0	0.75
24	12.99	7.29	487	103	0	0.75
25	13.95	6.43	221	121	0	0.72
26	10.17	9.88	281	107	0	0.7
27	9.94	10.09	273	106	0	0.76

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan las tablas IX y X. La tabla IX son los datos de las condiciones de operación de la caldera, la generación del turbo y del combustible, en el momento del análisis realizado de los gases de combustión para cada uno de los 27 días. La tabla X presenta el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los datos de la tabla IX.

Tabla IX. Condiciones de operación durante las mediciones de bagazo y características del bagazo

No. de medición	Presión (kg/cm ²)	Flujo (Ton/h)	Bagazo consumido (Ton/h)	Carga turbo generador (MW)	PoI bagazo	Humedad del bagazo	Cp del bagazo (kJ/kg)
1	162	102	79	40.0	2.460	50.515	9039.058
2	161	103	67	39.0	2.445	50.415	9062.000
3	155	104	84	39.0	2.475	50.655	9008.345
4	166	107	75	38.0	2.140	50.760	9066.366
5	165	103	69	37.5	2.215	50.715	9057.552
6	163	104	73	40.0	2.415	50.775	8999.075
7	168	105	85	40.0	2.475	50.935	8953.941
8	77	107	67	15.0	2.585	51.005	8914.589
9	162	102	87	32.0	2.475	50.085	9119.096
10	160	100	83	33.0	2.415	50.320	9087.481
11	161	105	81	38.0	2.230	50.285	9137.590
12	165	103	79	38.0	2.485	50.860	8966.172
13	163	101	94	36.8	2.490	50.355	9063.123
14	156	107	59	36.0	2.64	50.340	9030.923
15	160	105	83	36.0	1.900	50.810	9112.834
16	143	101	70	36.0	2.435	50.760	8997.307
17	154	101	70	37.0	2.295	51.000	8983.449
18	155	107	84	34.0	2.360	51.165	8936.173
19	155	102	89	32.0	2.475	50.805	8979.200
20	150	105	81	34.0	2.375	50.760	9011.353
21	155	100	82	36.0	2.295	51.180	8948.475
22	164	106	72	37.0	2.265	50.685	9051.676
23	158	107	94	39.0	2.390	50.460	9066.132
24	160	102	84	39.0	2.140	51.260	8969.216
25	152	97	78	38.0	2.210	50.815	9039.293
26	148	106	72	35.0	1.880	50.910	9098.086
27	148	104	95	33.0	2.005	50.340	9179.575

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación para los datos de condiciones de operación cuando se quema bagazo y sus características

	Presión (kPa)	Flujo (Ton/h)	Bagazo consumido (Ton/h)	Carga turbo generador (MW)	Pol bagazo	Humedad del bagazo	Cp del bagazo (kJ/kg)
Promedio	155.04	102.81	79.11	35.86	2.33	50.70	9032.52
Desviación Estándar	16.77	4.05	9.05	4.82	0.19	0.30	65.80
Coeficiente de variación (%)	10.82	3.94	11.44	13.44	8.27	0.60	0.73

Fuente: elaboración propia.

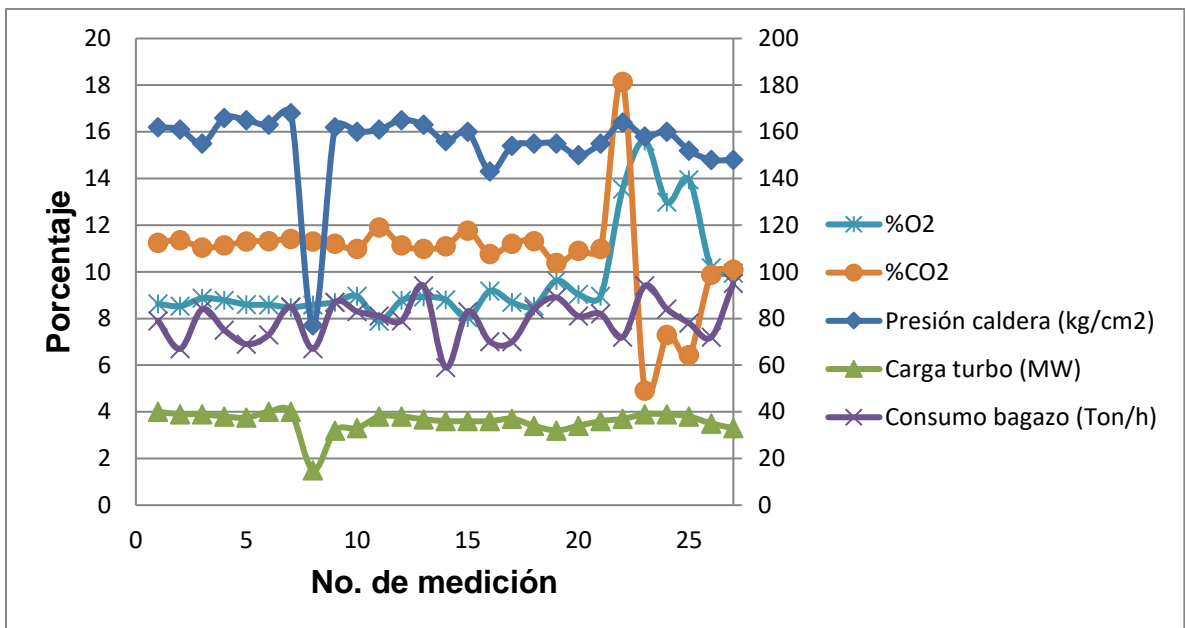
De las tablas IX y X se presenta el pol del bagazo que es la medida indirecta de la cantidad de sacarosa o azúcar que todavía contiene. Y el Cp que es el calor específico o la cantidad de energía que puede ser obtenida.

Las figuras 4, 5, 6 y 7 se obtuvieron de las tablas VIII y IX. En ellas se muestra el comportamiento del % de O₂ y CO₂, las ppm de CO, las ppm de NO_x y el flujo de gases respectivamente. En estas 4 gráficas se presenta también la presión de la caldera, la carga del turbo y el consumo de bagazo en los momentos de las mediciones, con el objetivo de analizar visualmente y determinar si hay relación entre estas variables y las emisiones de los gases.

Para un mejor entendimiento de éstas 4 figuras, se debe notar que el eje X es el número de medición, mientras que el eje Y se divide en dos; uno a la izquierda de las gráficas, y otro, a la derecha. El del lado izquierdo corresponde a la escala para la medición de concentración del gas, mientras que el del lado

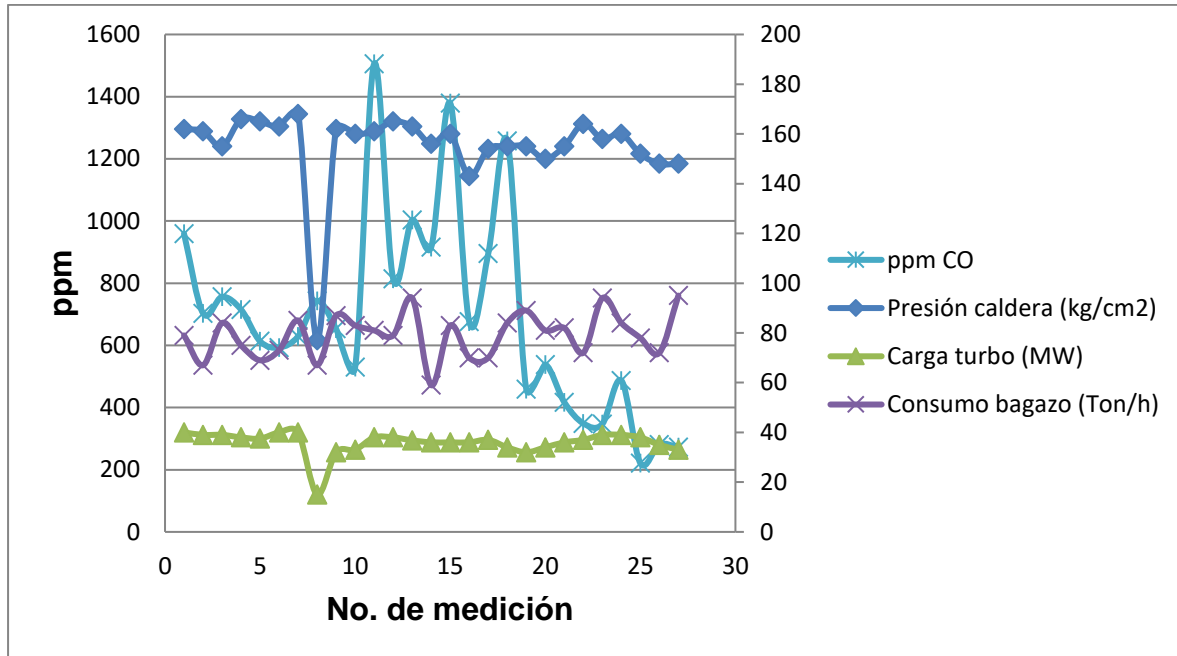
derecho corresponde a la escala para las demás variables, presión de la caldera, carga del turbo y consumo de combustible.

Figura 4. Comportamiento del porcentaje de O₂ y CO₂ en los gases cuando el combustible es bagazo de caña



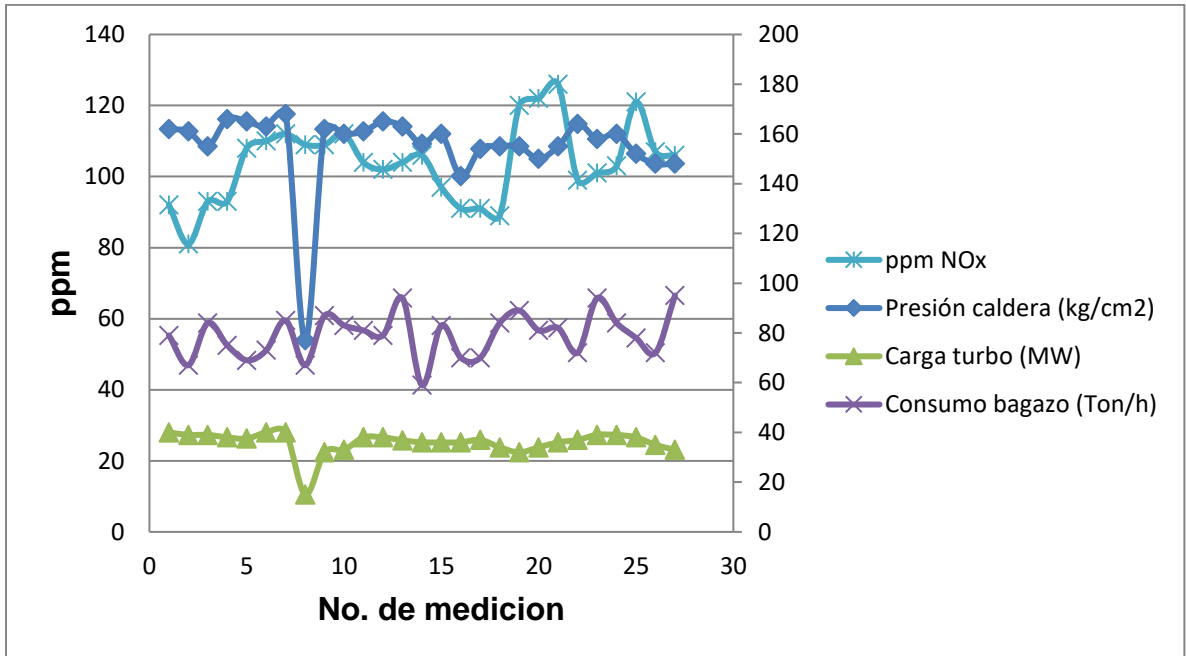
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Comportamiento de las ppm de CO en los gases cuando el combustible es bagazo de caña



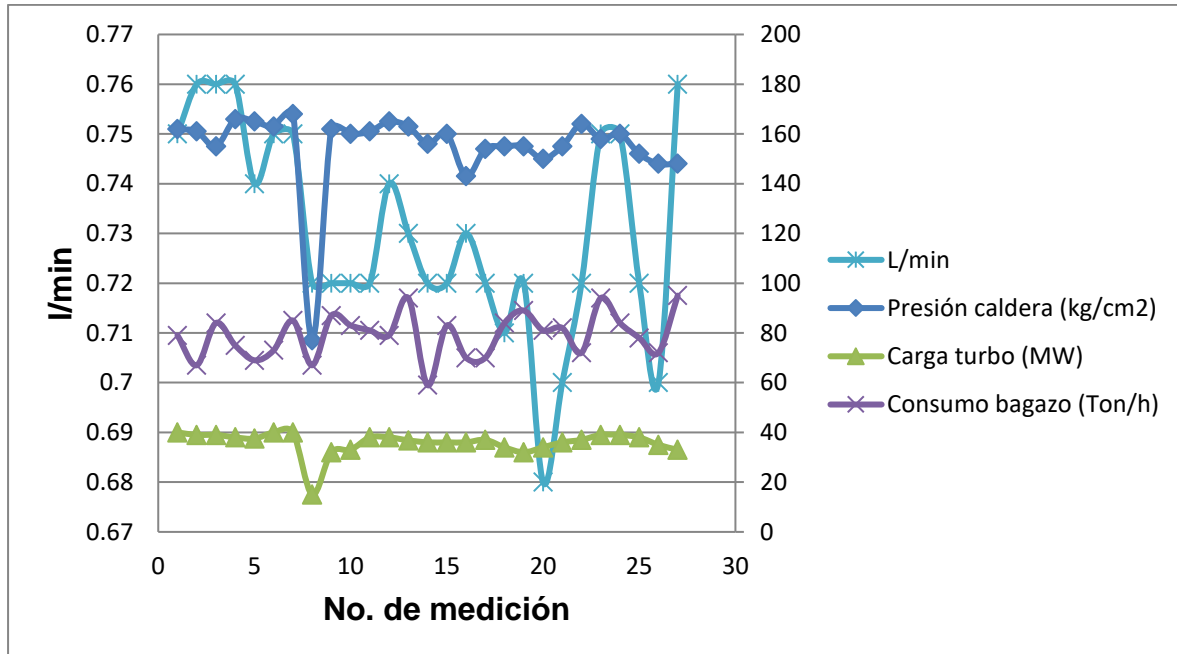
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Comportamiento de las ppm de NO_x en los gases cuando el combustible es bagazo de caña



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Comportamiento del flujo de los gases cuando el combustible es bagazo de caña



Fuente: elaboración propia.

2.3. Combustible carbón

Así como se presentaron datos de las mediciones para bagazo, así se presentan a continuación los datos obtenidos de las mediciones con carbón.

Tabla XI. Datos de gases obtenidos durante la época en que el combustible es carbón

No de medición	% O ₂	% CO ₂	ppm CO	ppm NO _x	ppm SO ₂	Flujo (l/min)
1	21.74	25.61	367	108	26	0.76
2	22.78	26.22	572	102	20	0.77
3	21.58	25.58	565	96	28	0.78
4	20.85	23.21	548	108	28	0.75
5	22.88	26.14	470	103	28	0.72
6	23.02	27.85	550	104	20	0.73
7	22.98	26.02	426	106	25	0.74
8	19.98	25.24	385	118	26	0.72
9	24.96	30.58	540	116	26	0.75
10	20.35	24.62	494	108	24	0.73
11	22.12	24.58	494	112	28	0.76
12	22.06	24.98	405	106	21	0.75
13	21.53	24.21	486	106	22	0.76
14	26.71	28.75	457	102	27	0.76
15	23.02	31.03	522	105	20	0.75
16	25.13	25.51	435	101	20	0.72
17	27.45	28.71	562	97	23	0.74
18	26.12	28.85	368	102	20	0.74
19	22.35	25.02	460	113	21	0.71
20	22.96	26.57	405	107	20	0.74
21	22.27	24.87	284	115	24	0.72
22	22.19	24.81	431	114	21	0.71
23	22.28	24.72	434	108	21	0.76
24	21.76	26.60	401	100	25	0.74
25	22.36	24.33	448	115	20	0.75
26	23.40	23.88	367	106	24	0.71
27	22.45	24.25	421	103	25	0.71
28	22.74	24.33	385	111	19	0.74

Fuente: elaboración propia.

Cuando se tomaron las mediciones de análisis de gases de combustión con bagazo, también se tomaron datos de la operación y de las características del bagazo. Con carbón también se tomaron los datos de operación y de sus características y se presentan en la tabla XII. Al tener los datos de operación se puede también comparar en este aspecto entre ambos combustibles y no sólo en emisiones.

En la tabla XIII, se muestran los promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación obtenidos de la tabla XII para cada uno de las columnas. De esta manera, se puede analizar de mejor manera la estabilidad de la operación y de las características del combustible.

Tabla XII. **Condiciones de operación durante las mediciones de carbón y características del carbón**

No. de medición	Presión (kPa)	Flujo (Ton/h)	Carga turbo generador (MW)	Consumo de carbón (Ton/h)	Cp carbón (kCal/kg)	Cp carbón (kJ/kg)
1	163	109	44.0	18	6454	27003.536
2	163	108	44.0	21	6454	27003.536
3	164	107	44.0	18	6454	27003.536
4	163	109	44.0	21	6454	27003.536
5	163	109	44.0	20	6454	27003.536
6	164	109	44.0	19	6454	27003.536
7	164	109	44.0	20	6454	27003.536
8	164	108	44.3	22	6454	27003.536
9	165	109	44.1	19	6454	27003.536
10	164	108	44.0	20	6454	27003.536
11	164	108	44.0	19	6454	27003.536
12	165	109	44.0	15	6454	27003.536
13	163	108	44.0	23	6454	27003.536
14	165	108	43.8	21	6454	27003.536
15	166	109	44.1	20	6441	26949.144
16	164	108	45.0	21	6441	26949.144
17	169	108	45.0	23	6441	26949.144
18	165	109	44.0	21	6441	26949.144
19	165	108	44.0	21	6441	26949.144
20	165	109	44.0	19	6441	26949.144
21	165	108	44.0	21	6441	26949.144
22	164	108	44.0	23	6441	26949.144
23	164	109	43.8	21	6441	26949.144
24	165	104	44.0	20	6441	26949.144
25	166	104	44.0	21	6441	26949.144
26	165	106	44.0	20	6441	26949.144
27	166	106	44.0	21	6441	26949.144
28	166	106	44.0	21	6441	26949.144

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación para los datos de las condiciones de operación cuando se quema carbón y sus características

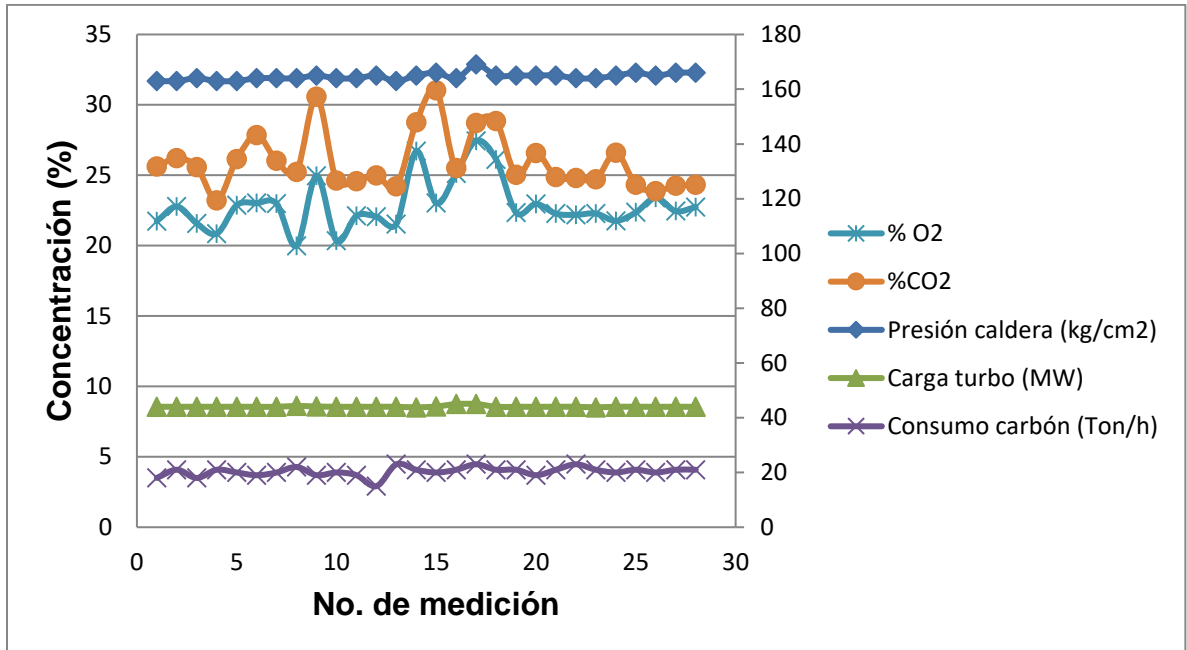
	Presión (kPa)	Flujo (Ton/h)	Carga turbo generador (MW)	Consumo de carbón (Ton/h)	Cp carbón (kCal/kg)	Cp carbón (kJ/kg)
Promedio	164.61	107.86	44.08	20.32	6447.50	26976.34
Desviación Estándar	1.29	1.43	0.27	1.68	6.62	27.70
Coeficiente de variación (%)	0.78	1.33	0.62	8.26	0.10	0.10

Fuente: elaboración propia.

Las figuras 8, 9, 10, 11 y 12 se obtuvieron de las tablas XI y XII. En ellas se muestra el comportamiento del % de O₂ y CO₂, las ppm de CO, las ppm de NO_x, las ppm de SO₂ y el flujo de gases respectivamente. Además, en estas 5 gráficas se presenta la presión de la caldera, la carga del turbo y el consumo de carbón en los momentos de las mediciones con el objetivo de analizar visualmente y determinar si hay relación entre estas variables y las emisiones de los gases.

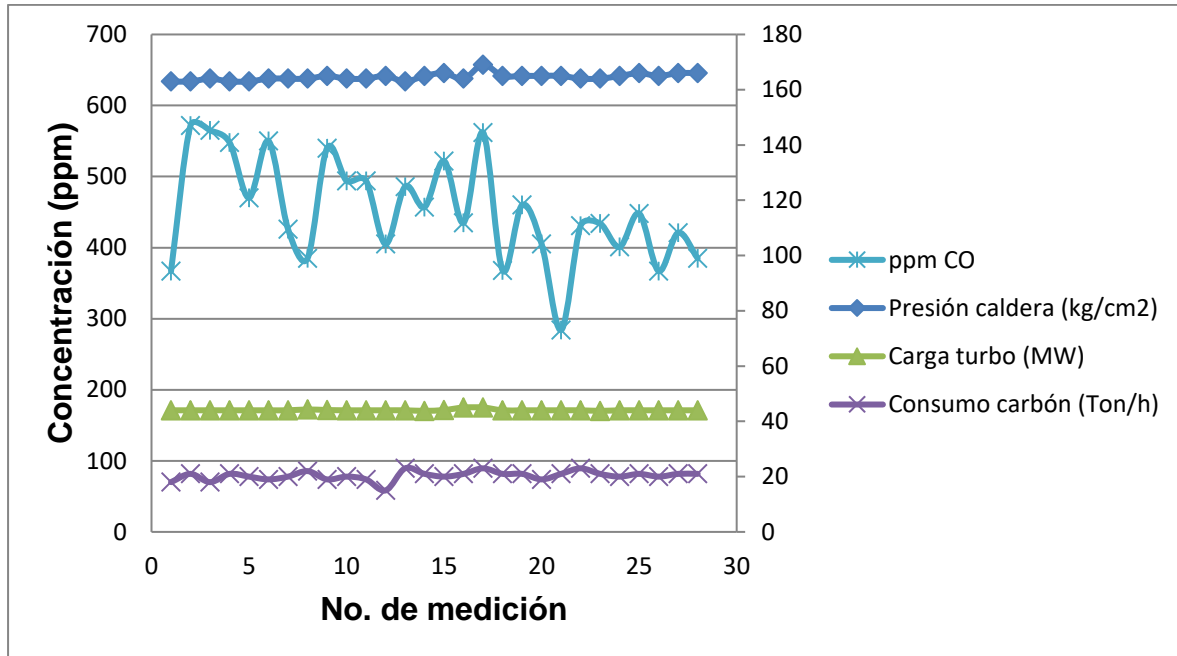
Para un mejor entendimiento al igual que en las figuras 4, 5, 6 y 7, el eje X es el número de medición, mientras que el eje Y se divide en dos: uno a la izquierda de las gráficas, y otro, a la derecha. El del lado izquierdo corresponde a la concentración del gas, mientras que el del lado derecho corresponde a todas las demás variables. Esta separación se hizo, debido a la escala de las mediciones y así visualizar los todos los comportamientos en la misma gráfica.

Figura 8. Comportamiento del porcentaje de O₂ y CO₂ en los gases cuando el combustible es carbón mineral



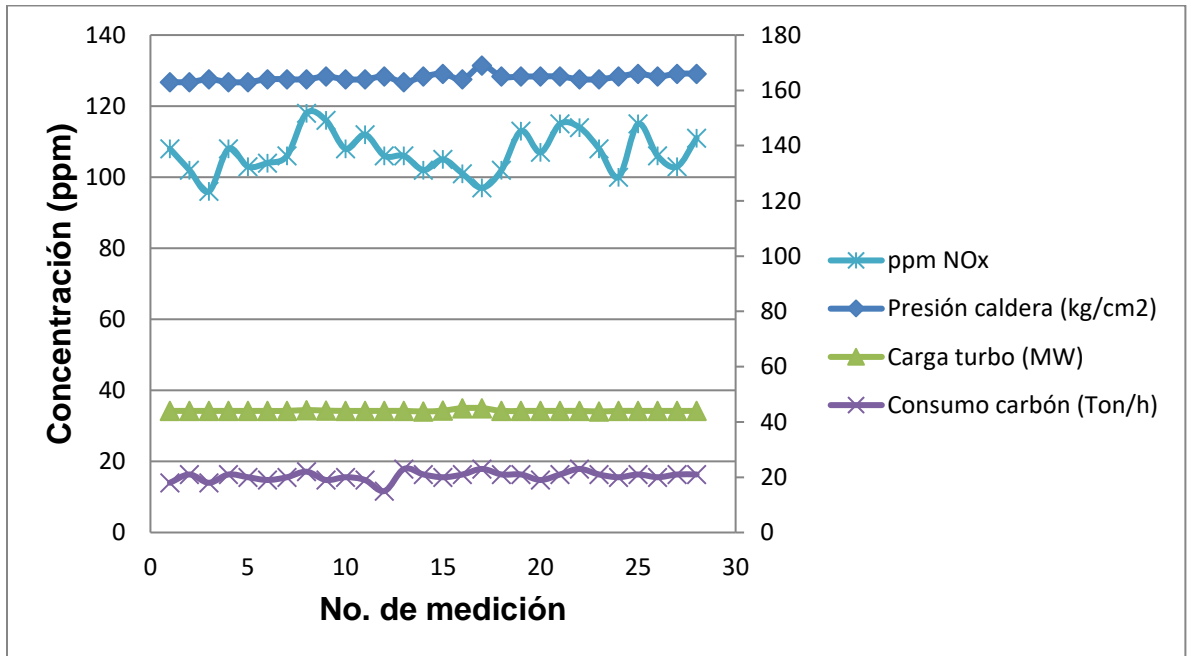
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Comportamiento de las ppm de CO en los gases cuando el combustible es carbón mineral



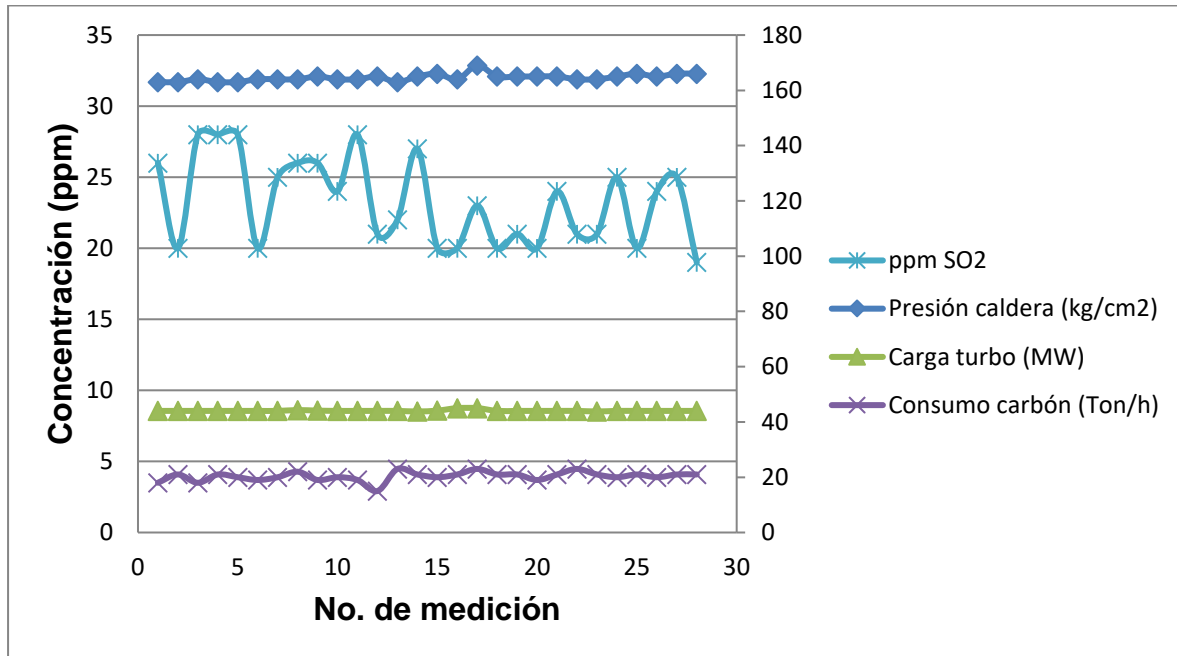
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Comportamiento de las ppm de NO_x en los gases cuando el combustible es carbón mineral



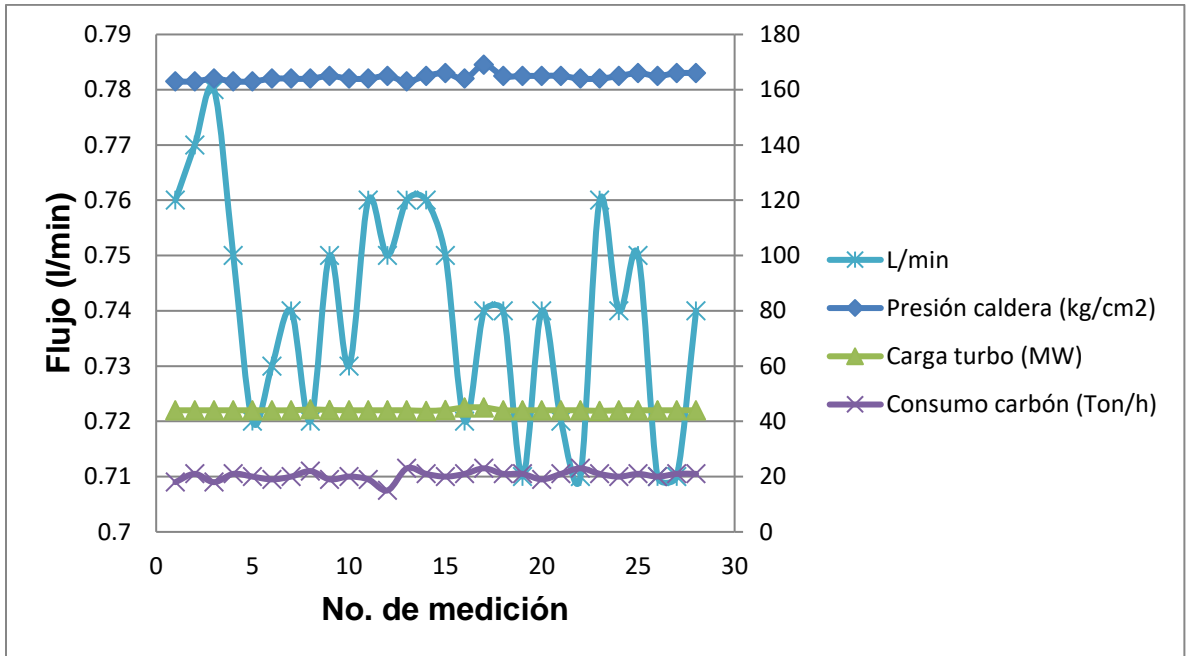
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Comportamiento de las ppm de SO₂ en los gases cuando el combustible es carbón mineral



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Comportamiento del flujo de los gases cuando el combustible es bagazo de carbón



Fuente: elaboración propia.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo da a conocer los resultados obtenidos para la investigación. Ya que se logran los objetivos planteados, este capítulo se divide en tres secciones, cada una con la información, datos, tablas y gráficos que cumplen cada uno de los objetivos.

3.1. Parámetros de medición y sus límites de emisión

Sin saber que parámetros medir no se puede realizar la investigación. En la tabla VI se presenta por tipo de combustible los principales gases que se forman por la combustión, para el carbón son CO_2 , CO , H_2O , SO_2 , N_2 , O_2 . El nitrógeno está en el aire y si sale de la combustión como N_2 solo pasa de largo sin reaccionar por lo que en realidad no es un gas contaminante. En la tabla V, se observa que para generación eléctrica como el caso del ingenio los mayores contaminantes generados son SO_2 y NO_x . Según la Empresa Nacional de Electricidad, S.A. de España para el caso de carboneras los principales gases de contaminación son CO_2 , NO_x y SO_2 .

En la figura 1, se muestran todas las reacciones que puede experimentar el bagazo de caña por combustión y también los gases emitidos son CO_2 , CO , N_2 , NO_x y SO_2 . El NO_x y SO_2 son los mayores contaminantes para carbonera y también son generados en combustión de bagazo. El CO_2 y el CO son los otros dos gases elegidos, estos son propios de la combustión.

Ya sabiendo que se va a medir es necesario determinar la cantidad de emisiones permitidas. Para esto se tomaron los límites establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), los datos obtenidos se presentan a continuación en la tabla XVII.

Tabla XIV. **Parámetros medidos y sus límites de emisiones**

Gas	Bagazo de caña	Carbón mineral
CO ₂ (%)	13	18
CO (ppm)	250	250
NO _x (ppm)	400	200
SO ₂ (ppm)	400	400

Fuente: elaboración propia.

3.2. Estimación de las emisiones de los parámetros elegidos

Una vez se conocen los gases del estudio y se sabe que los valores límites están expresados en porcentaje para el CO₂ y concentración en ppm para los otros 3 gases, es necesario estimar las emisiones de los gases. Las tablas XV y XVI muestran las estimaciones de cada uno de los 4 gases del estudio. La estimación se muestra como un valor promedio de los datos de las tablas VIII y XI para bagazo y carbón respectivamente. También se calculó la desviación estándar y el coeficiente de variación para su posterior análisis y comparación en el capítulo 4.

Tabla XV. Promedio de emisión, desviación estándar y coeficiente de variación para CO₂, CO, NO_x y SO₂ cuando se quema bagazo

	% CO₂	ppm CO	ppm NO_x	ppm SO₂
Promedio	10.79	693.07	104.00	0
Desviación estándar	2.20	327.18	11.03	0
Coeficiente de variación (%)	20.42	47.21	10.61	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Promedio de emisión, desviación estándar y coeficiente de variación para CO₂, CO, NO_x y SO₂ cuando se quema carbón

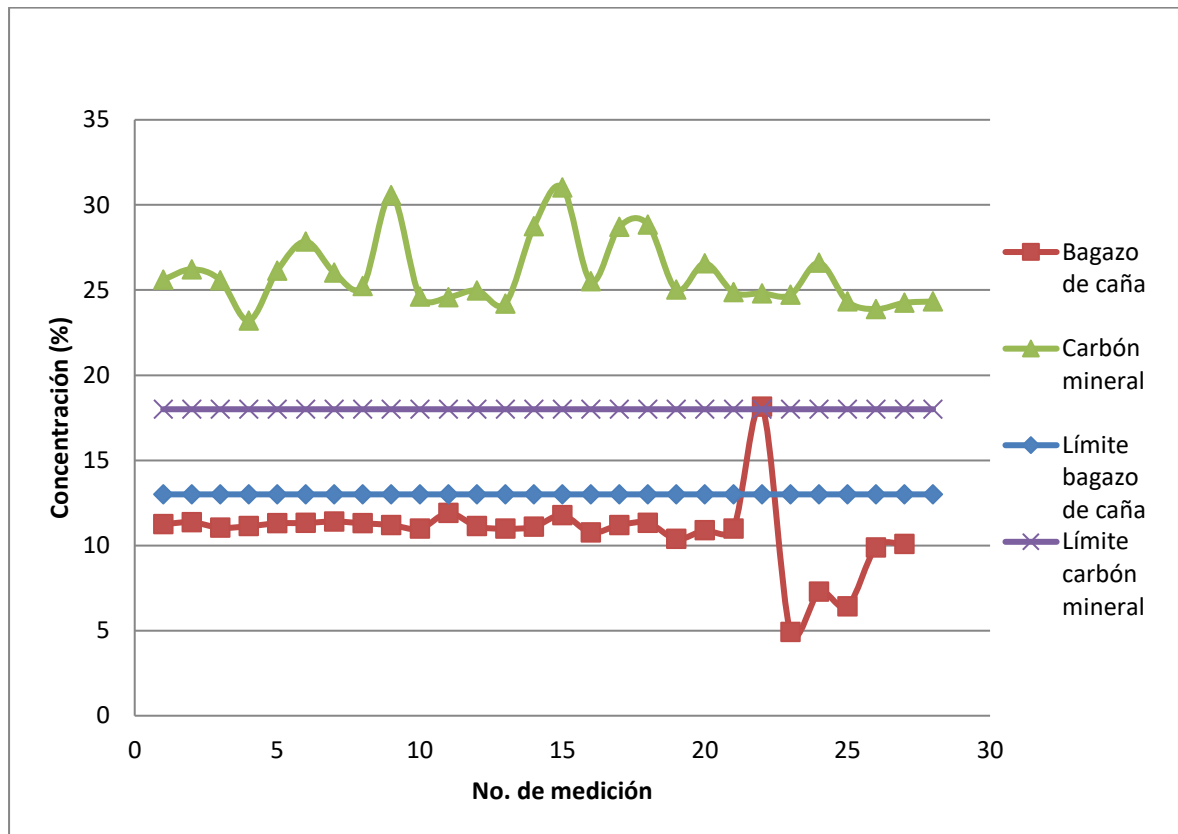
	% CO₂	ppm CO	ppm NO_x	ppm SO₂
Promedio	25.97	452.93	106.86	23.29
Desviación estándar	2.01	73.09	5.74	3.05
Coeficiente de variación (%)	7.74	16.14	5.37	13.11

Fuente: elaboración propia.

3.3. Comparación de emisiones entre ambos combustibles y entre sus límites de emisión

Esta tercera parte del capítulo 3 consta de cuatro gráficas en las que se puede realizar una comparación visual y rápida de los parámetros medidos en bagazo y carbón con lo que la normativa indica como límite. Al final se presenta una tabla resumen con valores promedio para cada gas medido.

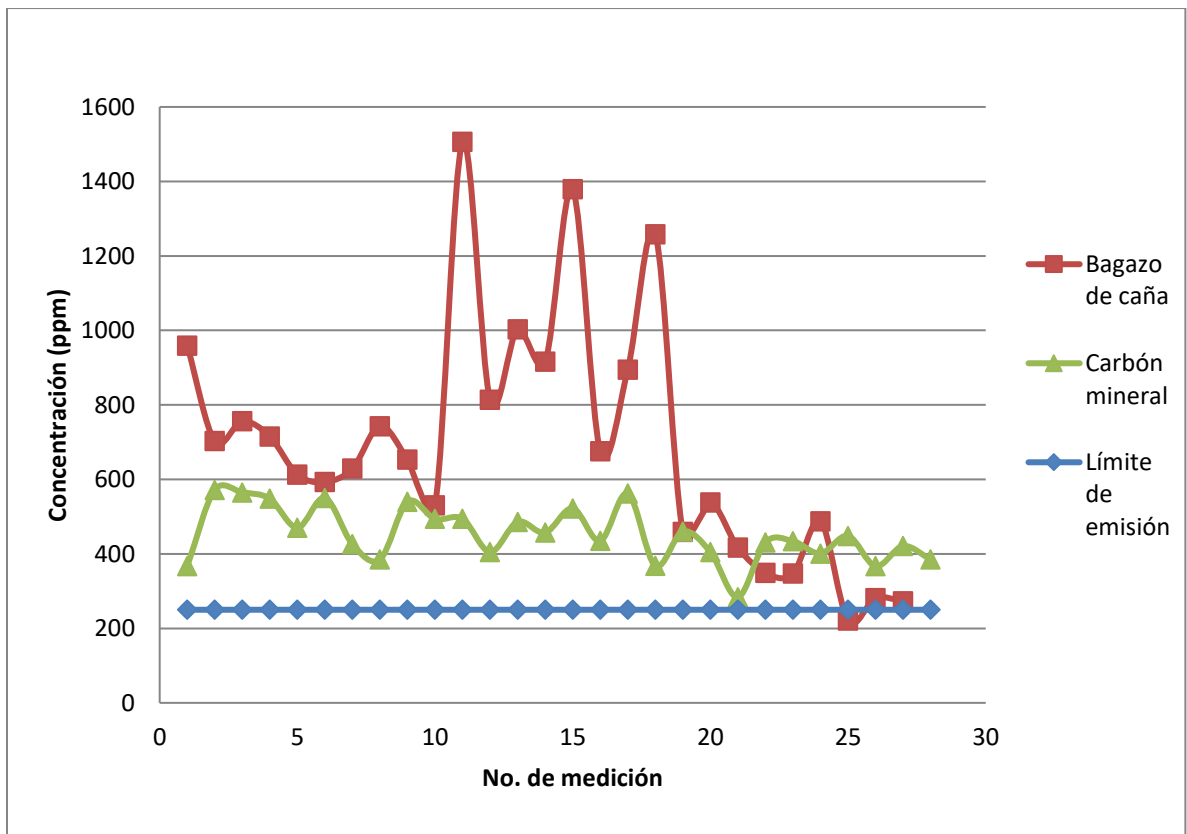
Figura 13. **Emisiones de CO₂ cuando se quema bagazo de caña o carbón mineral y límite de emisión del gas**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 13, se observa que para el CO₂ los límites son distintos, 18 % para el carbón y 13 % para el bagazo. Se observa que las emisiones de este gas cuando se quema bagazo están por debajo del límite normativo en todos los casos menos uno. También siempre está por debajo de las emisiones que genera el carbón, es decir, que usa bagazo como combustible tiene un impacto en generación de CO₂, por debajo del normado y menor al que se obtiene usando carbón. Las emisiones por el carbón con respecto a su límite normado se encuentran siempre por encima del límite.

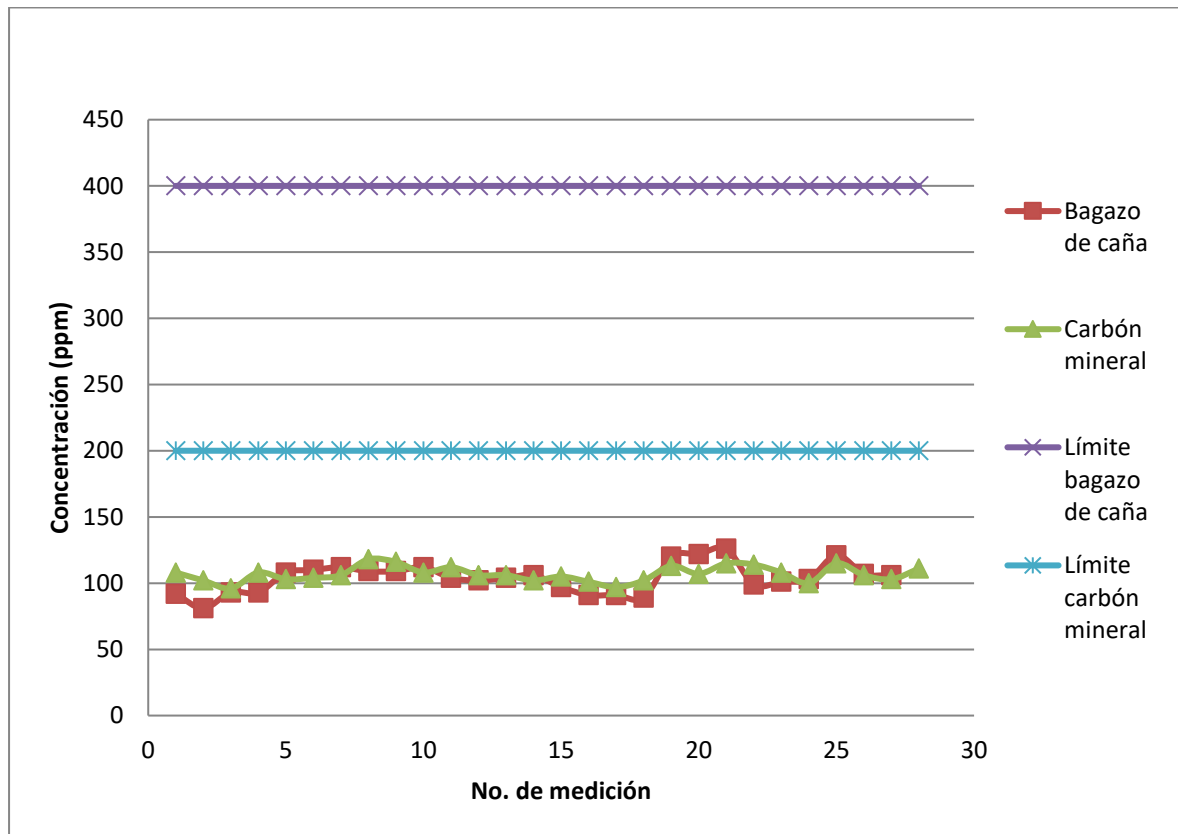
Figura 14. Emisiones de CO cuando se quema bagazo de caña o carbón mineral y límite de emisión del gas



Fuente: elaboración propia.

En caso del CO se presenta en la figura 14. Ambos gases tienen el mismo límite normado de 250 ppm, sin embargo, ambos gases se encuentran por encima de este límite. A diferencia de lo observado en el CO₂ ahora es el bagazo de caña el que tiene las mayores emisiones al medio ambiente.

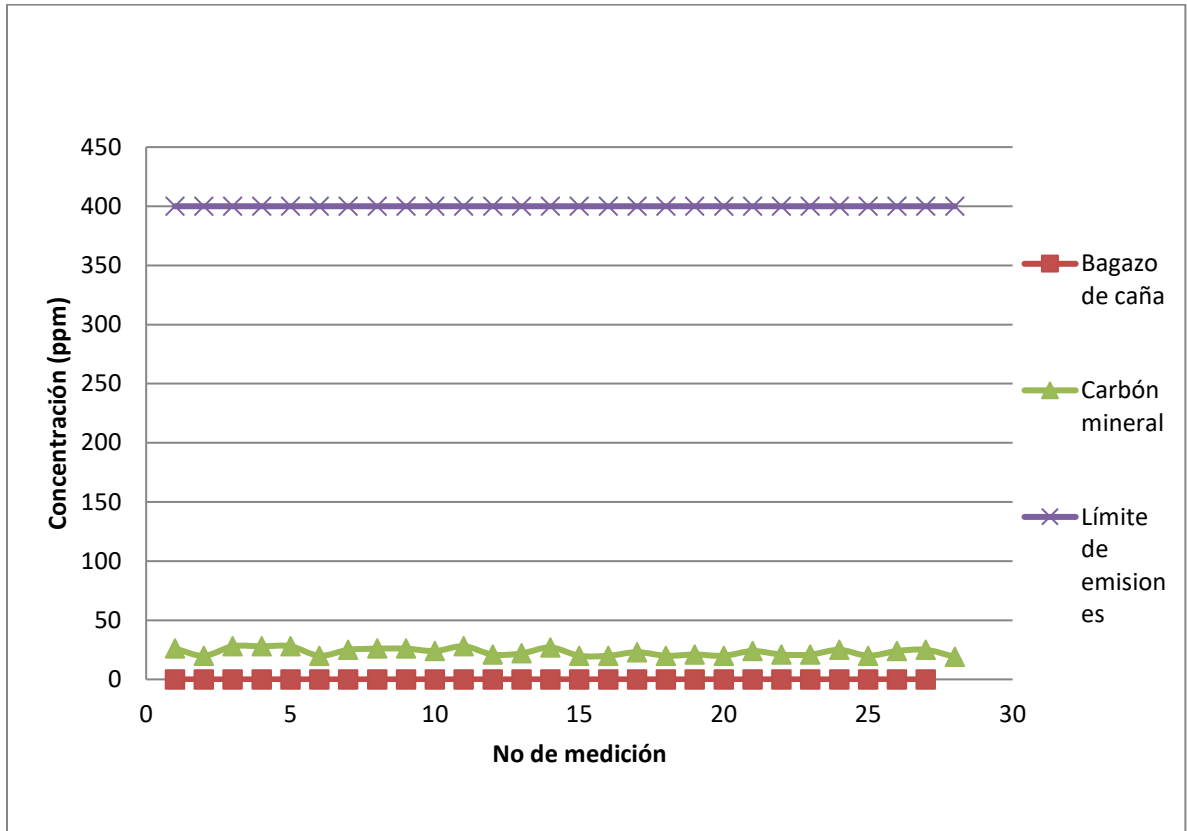
Figura 15. **Emisiones de NO_x cuando se quema bagazo de caña o carbón mineral y límite de emisión del gas**



Fuente: elaboración propia.

La figura 15 muestra las emisiones de NO_x. Se observa que las emisiones para ambos combustibles son muy similares, los valores están muy cercanos entre sí. Se observa menor variabilidad de los datos que los casos anteriores. Se aprecia que el límite de emisiones para el bagazo de caña es el doble de lo permitido para carbón de mineral, pero en ambos casos las emisiones están por debajo del límite de carbón mineral que es de 200 ppm y es el más bajo.

Figura 16. **Emisiones de SO₂ cuando se quema bagazo de caña o carbón mineral y límite de emisión del gas**



Fuente: elaboración propia.

El último gas en compararse es el SO₂, lo primero que resalta es que el límite de emisiones establecido es el mismo para ambos casos y que está muy por arriba de los datos obtenidos de las mediciones de este gas para ambos combustibles. En el caso del bagazo de caña no presenta emisiones y el carbón tiene emisiones siempre por debajo de las 50 ppm que es apenas 12.5 % del rango permitido.

Tabla XVII. Promedios de emisiones de los gases CO₂, CO, NO_x, SO₂ cuando se quema bagazo de caña o carbón mineral y su respectivo límite de emisión

	Emisión cuando se quema bagazo de caña				Emisiones cuando se quema carbón mineral			
	CO ₂ (%)	CO (ppm)	Nox (ppm)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	Nox (ppm)	SO ₂ (ppm)
Límite	13.00	250.00	400.00	400.00	18.00	250.00	200.00	400.00
Promedio	10.79	693.07	104.00	0.00	25.97	452.93	106.86	23.29
Desviación estándar	2.20	327.18	11.03	0.00	2.01	73.09	5.74	3.05
Coefficiente de variación (%)	20.42	47.21	10.61	-	7.74	16.14	5.37	13.11

Fuente: elaboración propia.

La tabla XVII muestra los valores límite, según las normas, el promedio que es la emisión medida, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Con esta tabla se compara de manera más puntual.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo de la investigación es comparar el impacto ambiental en el aire generado por el uso de bagazo y carbón mineral, en la caldera de la unidad de negocio de generación o cogeneración de un ingenio azucarero. Para lograr el objetivo era necesario realizar mediciones de las emisiones al medio ambiente, de los gases provenientes de la combustión de estos dos combustibles. Por lo tanto, se decidió que el punto ideal para esta medición era la parte alta de la chimenea que es donde los gases son liberados al medio ambiente.

No se puede medir si no se sabe qué medir, por lo tanto, la primera parte de la investigación fue determinar los componentes o gases que son generados por la combustión de bagazo y de carbón. Según la Universidad de Oviedo (tabla V) los principales componentes de las emisiones de una generadora eléctrica son NO_x y SO_2 . Según la tabla VI, que describe los gases emitidos al combustionar distintos combustibles se emiten, al quemar carbón se libera CO_2 , CO , H_2O , SO_2 , N_2 y O_2 y al quemar biomasa se libera CO_2 , CO , N_2 , NO_x , CH_4 , HC , H_2O . El N_2 está presente en el aire, por lo que entra a la combustión en el aire y vuelve a salir, por esta razón no fue tomado en cuenta, realmente no es un gas generado por la combustión. La figura 1 muestra los productos de la combustión del bagazo, los productos son CO_2 , CO , H_2O , SO_2 , N_2 y NO_x , por lo tanto, se eliminó el CH_4 y los HC , porque si bien son productos de la biomasa no aplican específicamente en el bagazo.

Los gases que se incluyeron fueron CO_2 , CO , NO_x y SO_2 . Los últimos dos porque son los principales en generadoras eléctricas, el CO_2 por ser el principal

gas de efecto invernadero y ser producto teórico de todas las combustiones y el CO, porque es indicador de combustión incompleta, además de que los cuatro gases son productos de combustión, tanto del bagazo como del carbón.

Luego de tener los gases a medir, se requirió compararlos. La comparación entre ellos mismos surgirá con las mediciones, también se tenía como objetivo comparar con algún límite de emisiones. Estos límites se encuentran en leyes o reglamentos, idealmente se deberían usar los del país en donde se está haciendo el estudio; sin embargo, Guatemala no posee ninguna ley de emisiones al aire para colocar un límite; para su comparación se buscaron en organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS por sus siglas en inglés) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés).

La OMS tiene publicados límites para todos los gases elegidos, para el estudio (tabla II); sin embargo, estos límites no están referidos a actividades industriales, sino más bien a ambientes cerrados, por lo que los límites son muy bajos. Sin embargo, dan una idea de las bajas concentraciones que se requieren para tener efectos negativos en la salud de las personas. La EPA sí tiene límites para actividades industriales y están clasificados por el tipo de actividad y por el tamaño de la industria. Se tomaron los límites para industrias de combustibles sólidos con generación de 50 MW, que es el caso del bagazo, y para carboneras de generación de 50 MW que es el caso del carbón (Tablas III y IV). La turbina del ingenio tiene una capacidad de 46 MW.

Los límites de comparación con normas internacionales quedaron para el bagazo de caña en 13 % de CO₂, 250 ppm de CO, 400 ppm NO_x y 400 ppm para el SO₂. Y el carbón mineral fueron 18 % CO₂, 250 ppm de CO, 200 ppm NO_x y 400 ppm para el SO₂.

Con los gases a medir y sus límites se prosiguió a realizar las mediciones. Antes de realizar las mediciones es importante describir la caldera, ya que si se desea garantizar la repetitividad se debe conocer. La caldera es acuatubular, tiene capacidad de flujo de vapor de 110 Ton/h, de presión de vapor de 120 kg/cm². Esta caldera utiliza un precipitador electrostático (ESP) justo antes de la chimenea (figura 17).

Primero se hicieron las mediciones con bagazo y después con carbón, porque se inició cuando era zafra y en ese período no se quema carbón; al finalizar la zafra se comienza a quemar carbón. Del 11 de abril al 8 de mayo del 2016 se hicieron las mediciones quemando bagazo y del 18 de mayo al 2 de julio se hicieron las mediciones de los gases de combustión quemando carbón. Se hacía una vez por día a las 7 de la mañana. El período del carbón fue más largo, ya que la generación cuando no es zafra depende del Administrador del Mercado Mayorista que es un ente guatemalteco que regula a los generadores, en ocasiones se solicitaba a la generación del ingenio parar.

La medición se hizo con el equipo testo 340. Este equipo lo utilizan en el ingenio para medir las eficiencias de las calderas. De acuerdo a la composición de los gases, se puede calcular la eficiencia de la caldera, pero la medición debe realizarse antes de que los gases pasen por algún sistema de retención o limpieza como el ESP. La toma de muestras empieza tomando una muestra del aire del medio ambiente y luego se introduce la sonda dentro de la chimenea para hacer la lectura (figura 2). La medición del medio ambiente luego automáticamente es restada a la medición dentro de la chimenea para conocer sólo las emisiones. El equipo usa métodos CMT (Conditional Test Methods) a base de celda electroquímica, estos métodos son publicados y están avalados por la EPA. Ya que los límites de emisiones utilizados también son de EPA resulta idóneo que el método de medición también lo sea.

Otro factor importante es el combustible. Para el bagazo se le hace análisis cada hora de pol, brix y humedad. Este combustible es muy cambiante y depende de muchos factores, como el lavado de la caña, la maduración y el tiempo de corte de la misma, su paso por los molinos, etc. En la tabla IX se puede observar las condiciones a las que estaba el bagazo durante los análisis. El otro combustible que es el carbón es comprado y almacenado, no se tienen los equipos de los métodos para realizarle análisis propios, sólo se tienen los de los certificados de compra. En la tabla XII, se pueden observar los datos de las condiciones del carbón durante las mediciones.

En los gráficos del 4 al 12 se graficaron las emisiones versus las características del combustible, pero no se evidencia relaciones directas. Posiblemente se debe a que para un análisis así se requeriría hacer varios análisis durante el día y por varios días, para tener mejores tendencias y que los efectos sean percibidos.

Las mediciones con el testo dieron resultados en simultaneo de los 4 gases de interés. El primer parámetro es el CO₂, el promedio de las mediciones es de 10.79 % y 25.97 % cuando se quema bagazo de caña y carbón mineral, respectivamente. La polución con carbón es 2.5 veces más que la que existió cuando el combustible era bagazo. Se demostró que quemar carbón produce más emisiones de CO₂ y por lo tanto, más impacto sobre el calentamiento global y cambio climático. A pesar de que el límite de emisiones para el carbón es mayor que para el bagazo, las emisiones de CO₂ están por encima del 18 % permitido, lo que representa un 44 % por encima. Mientras que las emitidas con bagazo están por debajo del 13 % permitido, 17 % por debajo del límite. En la figura 13, se observa este comportamiento. El CO₂ es el gas con menos variación de un día a otro, además de observarlo gráficamente (figura 13) también se comprueba al observar que las desviaciones estándar de la distribución de datos son de apenas 2.20 con bagazo y 2.01 con carbón.

El segundo parámetro que fue medido es el CO, para las emisiones en la chimenea cuándo se quema bagazo de caña se obtuvo un valor promedio de 693.07 ppm y de 452.93 ppm cuando se quema carbón mineral. A diferencia de lo que ocurre con el CO₂, ahora se demuestra que el combustible que más emisión de CO genera hacia la atmósfera es el bagazo. También este dato es el más cambiante de un día a otro entre los cuatro medidos; como el CO está directamente relacionado con la combustión incompleta, puede pensarse que es difícil controlar un movimiento uniforme y repetible dentro del hogar de la caldera, entonces el combustible puede estar tomando diversas rutas por lo que en ocasiones las partículas del combustible no se retienen el tiempo suficiente y salen en los gases como CO. También puede deberse a que el tiempo de retención del combustible en el horno no es el indicado. Pero al realizar la comparación con el límite de emisión para el CO (figura 14), que es de 250 ppm se determina que para ambos combustibles las emisiones están muy por encima del límite permitido. Cuando el combustible es bagazo la emisión está 443.07 ppm por encima, lo que es casi el doble del rango permitido y cuando el combustible es carbón está 202.93 ppm por encima que es poco más del 80 % del rango; en ambos casos está muy pasado.

También se analizó NO_x, con este gas se obtuvo valores promedio de 104.00 ppm para los gases generados por quema de bagazo de caña y 106.86 ppm para los gases generados por quema de carbón mineral. Este es el gas analizado del cual se tiene menor diferencia uno del otro. Se puede observar en la figura 15, que el comportamiento es muy similar y en ocasiones se tiene valores de emisión cuando se quema bagazo por encima de los valores obtenidos cuando se quema carbón. Si ambos valores son tan parecidos significa que el contenido del nitrógeno en la caña del ingenio y el carbón es muy similar. Al observar dónde está el límite de emisiones de NO_x, resulta que en los dos casos se está por debajo del límite, por lo tanto, en NO_x si se cumple emitir menos del valor internacional para ambos combustibles.

Finalmente, el cuarto gas del que se realizó medición fue el SO_x , con éste también se logra tener emisiones por debajo del límite. Cuando se quema bagazo de caña la polución es de 0 para este gas, lo cual indica que no hay emisiones y por ende, está por debajo del límite de 400 ppm. Entonces pareciera ser que la caña trae una cantidad de azufre tan poca que no llega a hacer reacción en la combustión y logra ser atrapado antes de que los gases sean emitidos a la atmósfera. El valor de emisión promedio para el SO_x cuando se quema carbón mineral fue de 23.29 con una desviación estándar de 3.05, la cual es muy baja e indica que el contenido de azufre en el carbón que llega al ingenio es constante. También se logra con carbón estar fácilmente por debajo del límite. Posiblemente, el azufre sea un compuesto que quede retenido en el ESP de la caldera, por eso no se evidencia en los gases de combustión.

CONCLUSIONES

1. Se determinaron como parámetros a medir los gases CO₂, CO, NO_x y SO₂ y se establecieron límites de emisiones de acuerdo a la EPA en 13 %, 250 ppm, 400 ppm y 400 ppm cuando se quema bagazo de caña y de 18 %, 250 ppm, 200 ppm y 400 ppm cuando se quema carbón mineral respectivamente.
2. En el CO₂ se emite 10.79 % cuando se quema bagazo que está 17 % por debajo del límite establecido de 13 %, cuando se quema carbón se emite 25.97 % que es 2.5 veces más emisiones y está 44 % por encima del límite establecido de 18 %.
3. Para el caso del CO se emite a 693.07 ppm cuando se está quemando bagazo que es 2.77 veces más que el límite permitido de 250 ppm, cuando se quema carbón se emite 452.93 ppm que es 1.81 veces más que el límite de 250 ppm y representa el 65.35 % de las emisiones obtenidas con bagazo.
4. El NO_x genera 104 ppm en las emisiones con bagazo que es sólo un 25 % del límite establecido de 400 ppm y genera 106.86 ppm en las emisiones con carbón que es 50 % del límite establecido de 200 ppm. La diferencia entre ambos es poco significativa, pues es de 2.75 %.
5. En emisiones de SO₂, se midieron cero emisiones para los gases de la combustión del bagazo, y 23.29 ppm para los provenientes de la

combustión del carbón, que es muy bajo, ya que el límite es el 5.82 % del valor permitido de 400 ppm.

RECOMENDACIONES

1. El estudio fue realizado en un único ingenio, debido a que la industria azucarera es de las más grandes de Guatemala, se debería repetir en otros ingenios para crear un modelo de las emisiones de gases de los ingenios azucareros.
2. Si el combustible es de mejor calidad, se requerirá menos, por lo tanto, generará menos gases de combustión, por lo que se debería hacer un análisis más detallado de las propiedades de los dos combustibles versus emisiones al medio ambiente.
3. Además de emisiones gaseosas, la combustión también deja residuos sólidos que se extraen del horno y del precipitador electrostático; se recomienda un estudio para comparar la generación de sólidos entre bagazo y carbón, así como su correcta disposición y tratamiento, para minimizar el impacto ambiental.
4. Como se vio en la sección 1.7 existen varios métodos para la medición de gases, se podrían utilizar dos métodos en simultáneo para comparar los resultados y en diferentes horarios, especialmente un monitoreo continuo de varios días y comparando con datos de las estaciones ambientales cercanas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Academia Testo (2010). *Tecnología de análisis de gases*. [PDF].
Recuperado de:
<http://www.academiatesto.com.ar/cms/printpdf/book/export/html/647>
2. American Society of Testing Materials (2018). Test Methods. URL:
https://www.astm.org/search/fullsite-search.html?query=gas%20determination&resStart=0&resLength=10&tax0=test_methods&
3. Baird, C. (2004). *Química Ambiental*. 2da edición. Editorial Reverté. Bogotá, Colombia.
4. Bergman, J (2014). Ozono en la Tropósfera. URL:
https://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/ozone_tropo.html&lang=sp
5. Bieranowski, J (2009). *Comparasion of combustión gas emission by low power boilers fired by biomass obtained from wood*. [PDF]. Technical Sciences. Recuperado de:
http://www.uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/tech_12/B02.pdf
6. Brown, L (2000). *State of the world 2000*. Barcelona, España: Editorial Icaria.

7. Cook, P (2012). *Clean Energy, Climate and Carbon*. CSIRO Publishing. Australia.
8. Cubelo, A., Garea, B., Valdes, A., & División de Industria y Energía, Agencia de Ciencia y Tecnología. (2002). *Generación de electricidad a partir de bagazo*. URL: <http://www.fao.org/docrep/t2363s/t2363s0n.htm>
9. Domínguez, FI (2000). *El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire*. [PDF], España. Recuperado de: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp_549.pdf
10. Empresa Nacional de Electricidad, S.A. *Central de ciclo combinado litoral de Almería de 860 MW T.M. de carboneras*. [PDF], Almería, España. Recuperado de: <http://www.almediam.org/PDF/CENTRALDECICLOCOMBINADODECARBONERAS.pdf>
11. European Standards (2018). Engineering Standards. URL: <https://www.en-standard.eu/en-standards-engineering-standards/>
12. Gil, Z (2005). *Estudio del impacto ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en Cuba, estudio del caso Milenio Hernández*. URL: <http://dugi-doc.udg.edu/bitstream/handle/10256/4848/tzgu.pdf?sequence=1>

13. Gillenwater, M; Saarinen, K and Ajavon, A (2006). Precursores y Emisiones Indirectas. [PDF]. Recuperado de: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/1_Volume1/V1_7_Ch7_Precursors_Indirect.pdf
14. Guerra, J (2003). El ozono y su papel en el Sistema Atmosférico. *Información tecnológica*, 14 (2), 3-12.
15. Hall, N (2011). *Combustion*. URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/combst1.html>
16. Inspiration (2016). Gases de efecto invernadero. URL: <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/efecto-invernadero/gases-de-efecto-invernadero>
17. Isabelle, R (2016). Tipos de combustión. URL: http://www.lostipos.com/de/tipos_de_combustion.html
18. Jecht, U. (2012). *Análisis de gases de combustión en la Industria*. 2da edición. Lenzkirch, Alemania.
19. Jiménez, S. (2012). *Combustión el Carbón*. [PDF], España. Recuperado de: http://www.energia2012.es/sites/default/files/Combustion_de_carbon.pdf
20. Kelly, M., 1996. *Global Warming and the Third World*. Londres Inglaterra.

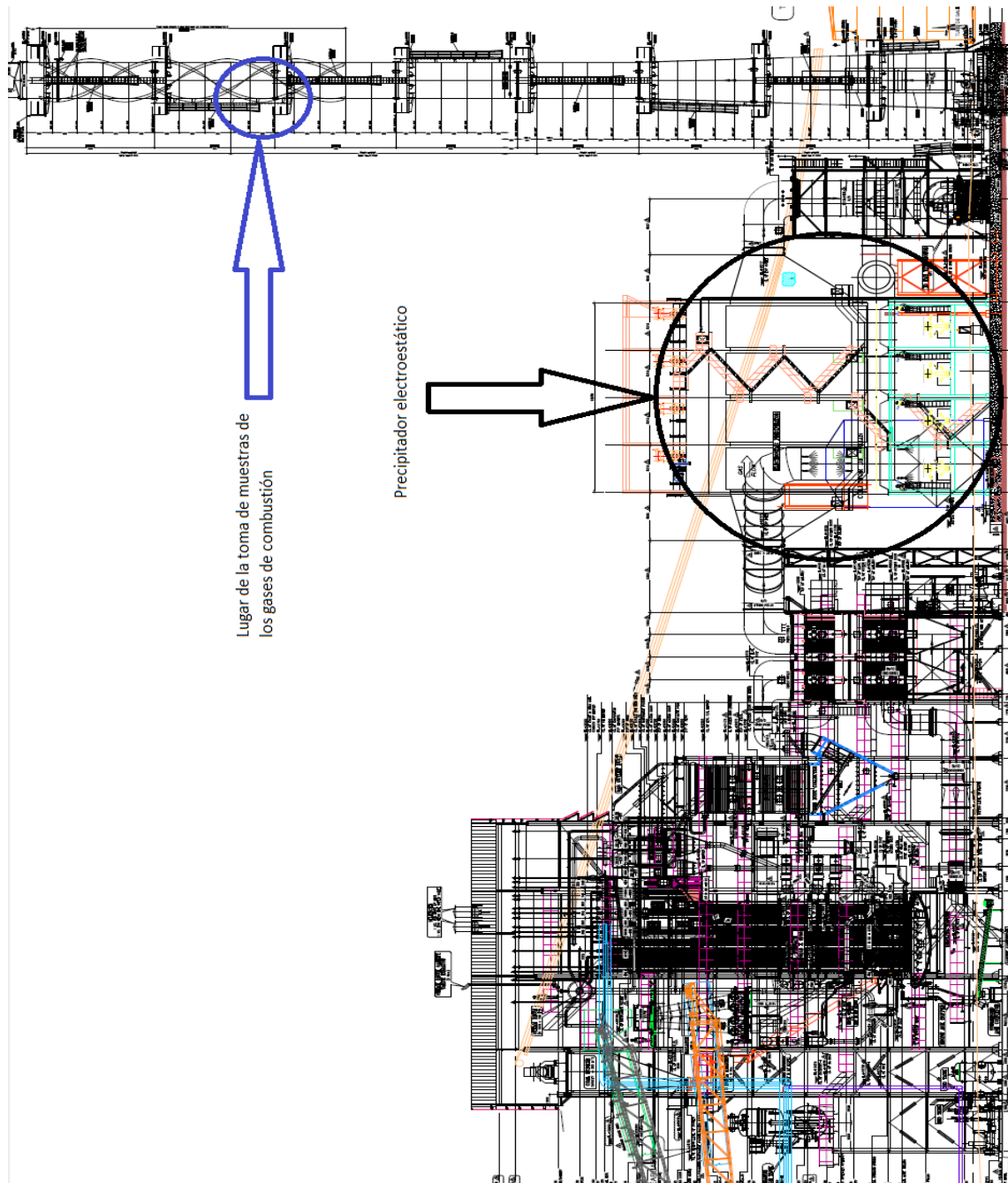
21. Ministerio de Energía y Minas (2015). *Estadísticas Energéticas Subsector Eléctrico* 2014. URL: <https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/05/Informe-de-Estadasticas-Energ%C3%A9ticas-2014.pdf&hl=es>
22. Morales, J (2011). *Impacto ambiental de la industria azucarera y estrategias de mitigación*. [PDF], Mexico. Recuperado de: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/32477/1/moralestrujillo.pdf>
23. Muñoz, M (2015). *Guía para determinar y reducir pérdidas de energía en generadoras de vapor*. Centro guatemalteco de investigación y capacitación de la caña. Guatemala.
24. Ochoa-Hueso, R. (2017). *Consecuencias de la deposición de nitrógeno sobre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres: Una aproximación general desde la ecología de ecosistemas*. Ecosistemas, vol. 26, núm. 1, enero-abril, 2017, pp. 25-36. Asociación Española de Ecología Terrestre Alicante, España
25. Oficina Catalana del Cambio Climático (2011). Metodología de inventarios de gases. [PDF], España. Recuperado de: http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/politiques/inventaris_demissions/mes_informacio_sobre_metodologies/metodologia_annex_es.pdf

26. Organización Mundial de la Salud (2017). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
27. Organización Mundial de la Salud (2017). La OMS establece parámetros para reducir los daños para la salud debidos a la contaminación del aire de interiores. URL: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/indoor-air-pollution/es/>
28. Rein, P. (2012). *Ingeniería de la Caña de Azúcar*. Bartens. Berlín Alemania.
29. Rivera, Rosario. (2009). Estudio de impacto ambiental. URL: <http://www.definicionabc.com/medio-ambiente/estudiosimpactoambiental.php>
30. Rolle, K. (2004). *Termodinámica*. Sexta Edición. Pearson Pertice Hall. Madrid. España.
31. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (1994) 12-02-94 *NORMA Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-1994, Contaminación atmosférica*. [PDF], México. Recuperado de: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69211.pdf>
32. Turner, J and Yamamoto, T (1999). *Controles de Materia Particulada*. ETS Inc. Estados Unidos.

33. Universidad Estatal de Oviedo (2012). *Estudio de impacto ambiental definitivo*. [PDF], Oviedo, España. Recuperado de: https://www.elaw.org/system/files/6010_Seccion%206%20-%20Evaluacion%20Impactos.pdf
34. Vian, Á (2007). *Introducción a la química industrial*. Reverté. Barcelona, España.

ANEXOS

Figura 17. Caldera del ingenio, punto de muestreo y precipitador electrostático



Fuente: Ingenio Palo Gordo.