

# Estudio isocinético de los gases de emisión de una caldera instalada en un ingenio azucarero

**RESUMEN:** Este artículo presenta el estudio de impacto ambiental de los gases contaminantes producidos por la combustión del bagazo de caña, los cuales son generados en los hornos de las calderas bagaceras como resultado del proceso de cogeneración en ingenios azucareros. Se implementó un estudio isocinético en un ingenio del Estado de Veracruz, en el cual se analizaron los gases de emisión de una caldera en los distintos elementos que conforman la chimenea. Se obtuvieron resultados de emisión de gases en condiciones normales de operación, realizando ajustes de corrección por presión y corrección por 5% de oxígeno. Las concentraciones obtenidas fueron, óxido de nitrógeno de  $C_3= 95.56 \mu\text{mol/mol}$  y para el bióxido de azufre de  $Er=5.84 \mu\text{mol/mol}$ . Comparando los resultados obtenidos con los límites de emisiones de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  permitidos por la normatividad vigente (700 ppmv y 375 ppmv respectivamente) estos resultados registraron una respuesta satisfactoria. Se comprobó de esta forma que los beneficios al medio ambiente son significativos, utilizando biomasa sólida como bagazo.

**Palabras clave:** caldera bagacera; gases de emisión; estudio isocinético; partículas suspendidas ( $\text{NO}_x$ ); partículas suspendidas ( $\text{SO}_x$ ).



## Colaboración

J.L. Arenas Del Ángel, J.J. Marín Hernández; J.A. Del Ángel Ramos, Universidad Veracruzana; H.A. León Bonilla; L.R. González Grovas, Instituto Tecnológico Superior de Xalapa; A.E. León Bonilla Universidad Tecnológica de Puebla

**ABSTRACT:** This paper presents the environmental impact that generates the contaminants, resulting from the combustion of solid as it is bagasse, held in bagasse boilers involved in processes in the sugar industry cogeneration biomass. An isokinetic study was implemented in a boiler installed in a sugar mill of the State of Veracruz, with which we analyzed the exhaust gases from the boiler in the different elements of the chimney. Emission results were obtained under normal conditions, performing settings related to pressure correction and a 5% for oxygen. In the case of nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) was obtained the value  $C_3= 95.56 \mu\text{mol/mol}$  and for concentration of sulfur dioxide ( $\text{SO}_x$ ) was obtained  $Er=5.84 \mu\text{mol/mol}$ . Comparing the results obtained with the limit emissions of  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_x$  specified on standards (700 ppm and 375 ppm respectively) we found It is satisfactory. It was prove that burn bagasse as a fuel is benefic for the environment.

**Keywords:** biomass; bagasse boiler; gases emissions; isokinetic study; nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ); sulfur dioxide ( $\text{SO}_x$ ).

## INTRODUCCIÓN

Nuestra sociedad en la actualidad ha incrementado su consumo energético como consecuencia del rápido desarrollo industrial y de todas aquellas actividades que permiten mantener sus niveles de confort. Estos procesos donde se da la transformación de energía, generan desechos o elementos que constituyen parte de la contaminación al medio ambiente. En este sentido se puede considerar el caso de los ingenios azucareros, que mediante procesos de cogeneración, utilizan calderas bagaceras, que a través de la combustión de un residuo (biomasa sólida) como lo es el bagazo, producen parte de la energía eléctrica requerida para el procesamiento de la caña de azúcar. Producto de esa combustión se tienen emisiones de contaminantes, cuya calidad depende del tipo de combustión y de las condiciones de operación del sistema.

Se sabe que la composición de partículas sólidas que se emiten a la atmósfera es diferente para cada tipo de caldera[1]. A simple vista puede detectarse principalmente la presencia de cenizas volantes, partículas de carbono (hollín), partículas de bagazo parcialmente quemado y material inorgánico (arena, arcilla, etc.).

Sin embargo, se ha comprobado que los gases de emisión contaminantes, son menores cuando se queman biomasa que cuando se hace uso de combustibles de origen fósil[2]. La presencia tanto de óxidos de nitrógeno (NOx), consecuencia de una mayor temperatura durante la combustión, como los óxidos de azufre (SOx), originados por las concentraciones de ese elemento en la composición elemental del bagazo, están presentes en los gases de combustión, en pequeñas cantidades. En general, para los diferentes tipos de biomasa, utilizada en los distintos procesos y por los diversos contaminantes que produce su uso. Se ha observado que el principal problema para conseguir que la biomasa no sea considerada un contaminante, es la falta de control durante su uso, ya que en la mayoría de los casos es utilizada en pequeñas instalaciones, lo que dificulta la reducción y el control de las emisiones, mientras que, en las grandes, la adopción de medidas e implantación de sistemas de limpieza es norma habitual[3].

### MARCO CONTEXTUAL

El presente estudio fue realizado en la zafra 2009-2010. Se eligió estratégicamente un ingenio azucarero del Estado de Veracruz para estudiar sus hornos tipo Ward modificados.

La caldera bajo estudio de marca Babcock & Wilcox del Ingenio fue instalada en el año de 1947. Constantemente ha sufrido una serie de transformaciones en los diversos elementos que la conforman y entre los cuales se encuentran sus hornos, sin embargo, estas atienden a recomendaciones empíricas del personal técnico y de ingeniería responsable.

La falta de recursos económicos del país ha ocasionado que los ingenios azucareros no puedan reemplazar sus unidades de generación de vapor, esto ha ocasionado que los cambios se lleven a cabo de forma escalonada para mejorar su funcionamiento[4].

### MATERIALES Y MÉTODOS

El equipo en análisis es una caldera Babcock & Wilcox diseñada para ser alimentada con combustóleo y/o bagazo, actualmente sólo opera con bagazo. Su capacidad nominal es de 3,248 caballos caldera. El horno es del tipo Ward modificado, al cual se le suministra aire caliente lateralmente y por la parte baja a través de una placa con rejillas. Originalmente el equipo no contaba con calentador de aire, recientemente se le adicionó uno tubular vertical con flujo cruzado a contracorriente con tres pasos por el flujo de aire. La caldera cuenta con un solo domo superior. La superficie de caldeo está formada por tubos rectos inclinados. Con el incremento de la presión de operación de la caldera y la introducción de un sobrecalentador se mejoraron las características del vapor vivo producido. La caldera cuenta con ventiladores de tiro forzado e inducido.

Se realizaron mediciones principalmente con instrumentos calibrados y confiables, algunos propios y otros proporcionados por personal técnico del departamento de instrumentación del Ingenio. Se utilizaron los siguientes instrumentos: un analizador de óxidos de nitrógeno de marca THERMO ENV. INST. INC y de Modelo: 10 AR; un analizador de eficiencia de combustión de marca SAUTER MESS y modelo SENSONIC 2000; un muestreador Isocinético de Marca: MCM y modelo S/Mo; un termómetro láser a color de marca RAYTEC y modelo Raynger 3i; un termoanemómetro de marca FLUKE y modelo 922; un termohigrómetro de contacto marca BK PRECISION y modelo 725; un multímetro digital de marca BK PRECISION y modelo 2890a; un termómetro de contacto de marca 54II.

### A. Memoria de Cálculo.

La ecuación 1 determina el volumen de gas seco muestreado.

$$V_m = V_f - V_i \quad \text{Ec.1}$$

Las ecuaciones 2a y 2b determinan el volumen de gas corregido a condiciones estándar.

$$V_{m, std} = 17.64 \gamma V_m \frac{P_{bar} + \frac{\Delta H}{13.6}}{T_m} \quad \text{Ec.2a}$$

$$V_{m, std} = 0.3855 \gamma V_m \frac{P_{bar} + \frac{\Delta H}{13.6}}{T_m} \quad \text{Ec.2b}$$

Las ecuaciones 3a y 3b determinan el volumen de vapor de agua convertido a condiciones estándar.

$$V_{w, std} = 0.04707 V_{lc} \quad \text{Ec.3a}$$

$$V_{w, std} = 0.00133 V_{lc} \quad \text{Ec.3b}$$

La ecuación 4 determina el por ciento de humedad por volumen.

$$P_{mos} = \frac{V_{w, std}}{V_{w, std} + V_{m, std}} 100 \quad \text{Ec.4}$$

La ecuación 5 determina la fracción mol de gas seco.

$$M_d = \frac{100 - P_{mos}}{100} \quad \text{Ec.5}$$

La ecuación 6 determina el peso molecular del gas seco.

$$M_{wd} = 0.44\%CO_2 + 0.32\%O_2 + 0.28(\%N_2 + \%CO) \quad \text{Ec.6}$$

La ecuación 7 determina el peso molecular del gas de chimenea.

$$M_s = M_{wd} M_d + 18(1 + M_d) \quad \text{Ec.7}$$

La ecuación 8 determina la presión a condiciones de chimenea.

$$P_m = P_{bar} + \frac{\Delta H}{13.6} \quad \text{Ec.8}$$

La ecuación 9 determina la presión absoluta.

$$P_s = P_{bar} + \frac{P_e}{13.6} \quad \text{Ec.9}$$

La ecuación 10 determina Velocidad del gas en la chimenea.

$$V_s = K_p C_p \sqrt{\frac{T_s \Delta P}{M_s P_s}} \quad \text{Ec.10}$$

La ecuación 11 determina el área transversal de la chimenea o ducto.

$$A = \pi r^2 \quad \text{Ec.11}$$

La ecuación 12 determina el flujo del gas seco en ducto en condiciones estándar.

$$Q_s = \frac{\frac{T_{std} T}{P_{std}} V_s A M_d P_s}{T_s} \quad \text{Ec.12}$$

La ecuación 13 determina el por ciento de muestreo isocinético.

$$I = \frac{1,667 T_s \left[ (0.00267 V_{lv}) + \left( V_m \frac{P_m}{T_m} \right) \right]}{P_s V_s T A_n} \quad \text{Ec.13}$$

La ecuación 14 determina la carga de partículas en condiciones estándar.

$$C_s = \frac{M_n}{V_m std} \quad \text{Ec.14}$$

Las ecuaciones 15a y 15b determinan la carga de partículas en condiciones de chimenea.

$$C_a = 17.64 \frac{C_s P_s M_d}{T_s} \quad \text{Ec.15a}$$

$$Q_s = \frac{\frac{T_{std} T}{P_{std}} V_s A M_d P_s}{T_s} \quad \text{Ec.15b}$$

Las ecuaciones 16a y 16b determinan la emisión de partículas.

$$E = 0.132215 C_s Q_s \quad \text{Ec.16a}$$

$$E = 60 C_s Q_s \quad \text{Ec.16b}$$

La ecuación 17 determina la velocidad de muestreo isocinético.

$$S_r = V_s A_n \frac{T_m P_s}{T_s P_m} \left( 1 - \frac{P_{mos}}{100} \right) \quad \text{Ec.17}$$

La ecuación 18 determina la corrección por 5% de oxígeno.

$$E_r = \frac{21 - O_r}{21 - O_m} \quad \text{Ec.18}$$

La ecuación 19 determina el exceso de aire en la combustión

$$EA = \frac{O_2 - 0.5CO}{0.26N_2 - O_2 + 0.5CO} 100 \quad \text{Ec.19}$$

La ecuación 20 determina la corrección por presión.

$$C_1 = \frac{C_2 P_2}{P_1} \quad \text{Ec.20}$$

La ecuación 21 determina la corrección por 5% de oxígeno.

$$C_3 = \frac{16.0 C_1}{21.0 - O_2} \quad \text{Ec.21}$$

Determinación de bióxido de azufre (SO<sub>x</sub>).

La ecuación 22 define la masa de bióxido de azufre colectada

$$P_s = P_{bar} + \frac{P_e}{13.6} \quad \text{Ec.22}$$

La ecuación 23 define la concentración de bióxido de azufre a condiciones normales.

$$C_1 = \frac{M_1}{V_n} \quad \text{Ec.23}$$

La ecuación 24 define la emisión de bióxido de azufre.

$$E_I = C_1 Q_s 10^{-3} \quad \text{Ec.24}$$

La ecuación 25 define las partes por millón en volumen de SO<sub>2</sub>.

$$ppmv = \frac{E_1}{Q_s \delta 10^{-6}} \quad \text{Ec. 25}$$

Finalmente se corrigen por 5% de oxígeno las emisiones de SO<sub>2</sub> utilizando la ecuación 18.

### B. Datos de Campo.

Todas las mediciones realizadas se obtuvieron respetando las especificaciones dadas por la normatividad correspondiente y los datos de campo generales del muestreo realizados para el estudio isocinético fueron los siguientes; hora de inicio (17:15) y final (18:15), tiempo total 60 minutos, distancia 8.82609 diámetros, tipo de zona no crítica. Altura, forma, diámetro y área transversal de la chimenea 57.80 m, circular, 2.30 m y 4.15 m<sup>2</sup> respectivamente, localización del puerto C.A. 37.50 m y C.B. 20.30 m, localización del puerto 1 y 2 de 0.36 m cada uno, presión barométrica 635.00 mmHg, coeficiente de Pitot 0.84, ΔH@ 2.0160, Ms 1.0161, número de puntos y puertos (12) y (2) respectivamente, diámetro interno de boquilla 0.95 cm.

La tabla 1 muestra el concentrado de los datos de campo en promedio y en grados Rankine.

Tabla 1. Concentrado de los datos

Punto	k	Tiempo de muestreo (min)	Distancia de punto de muestro (cm)	Lectura en gasómetro (m <sup>3</sup> )	Presión dinámica ΔP (mm H <sub>2</sub> O)	Delta H ΔH (mm H <sub>2</sub> O)	Presión estática Pe (mm H <sub>2</sub> O)	Temp. de chimenea (°C)	Temp. entrada medidor (°C)	Temp. salida medidor (°C)
Promedio	-	-	-	-	5.7362	78.124	3.1750	206.7593	19.9537	21.1111
Raíz cuadrada	-	-	-	-	2.3950	-	-	-	-	-
Rankin	-	-	-	-	-	-	-	479.91	293.68	293.68
Diferencia	-	-	-	1.567	-	-	-	-	-	-

Tabla 2 muestra los datos de campo de la medición de gases de tres lecturas o muestras del porcentaje de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO y N<sub>2</sub>, promedio, factor y PM del gas de cada una.

Tabla 2. Medición de gases.

GAS	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Promedio	Factor	PM del gas
% O <sub>2</sub>	3.90	3.90	3.90	3.9000	32/100	1.2480
% CO <sub>2</sub>	16.20	16.20	16.20	16.2000	44/100	7.1280
% CO	0.1010	0.1005	0.0970	0.0995	28/100	0.0279
% N <sub>2</sub>	79.799	79.800	79.803	79.8005	28/100	22.3441
Total:						30.7480

Tabla 3. Peso de impactores.

Parámetro	Valores.			
	1	2	3	4
Secuencia de impactores:				
Volumen final:	531.5	533.8	448.7	530.0
Volumen inicial:	523.3	529.7	447.3	524.3
Diferencia (mL):	8.2	4.1	1.4	5.7
Humedad total (mL):	19.40			

La tabla 3 y 4 muestran los parámetros de la secuencia del peso de los impactores, filtro y peso de partículas respectivamente.

Tabla 4. Filtro y peso de partículas.

Parámetros	Valor
Filtro n°:	FD-41
Peso final:	2.2865 g
Peso inicial:	1.8953 g
Subtotal 1	0.3912 g
Filtro n°:	N/A
Peso final:	0.0000 g
Peso inicial:	0.0000 g
Subtotal 2	0 g
Mn Total de partículas colectadas	0.3912 g
Diámetro interno de la chimenea:	90.55 in
Diámetro interno de la chimenea:	230.00 cm

Las tablas 5 y 6 muestran el resumen del muestreo efectuado de gases en ducto y del muestreo isocinético de partículas.

Tabla 5. Datos del muestreo de gases.

Parámetro	Magnitud	Magnitud
1. Muestreo N°	único	
2. Tiempo	60 min	
3. N° de puntos seleccionados	12	
4. Lectura del gasómetro	55.336 ft <sup>3</sup>	1.567 m <sup>3</sup>
5. Vol. Corregido en muestra a C. medidor	1566.95 l	1566.95 l
6. Fracción de gas CO <sub>2</sub>	16.2000 cmol/mol	7.1280 g/gmol
	O <sub>2</sub>	3.9000 cmol/mol
CO	0.0995 cmol/mol	0.0279 g/gmol
N <sub>2</sub>	79.8005 cmol/mol	22.3441 g/gmol

Tabla 6. Datos del muestreo isocinético de partículas.

Parámetro	Magnitud
1. Peso total de partículas	0.39 g
2. Diámetro de la boquilla	0.0095 m
3. Área de la boquilla	0.000767 ft <sup>2</sup>
4. Volumen de la muestra a C. CH.	1504.27 l
5. Volumen de la muestra en C.N.	1339.43 l
6. Velocidad de los gases de chimenea.	11.0702 m/s
7. Isocinetismo	92.732 %
8. Concentración de partículas	292.14 mg/m <sup>3</sup>
9. Emisión de partículas	24.24 kg/h

Las tablas 7 y 8 muestran los datos necesarios para la determinación de exceso de aire y su medición de gases.

Tabla 7. Datos necesarios para el cálculo del exceso de aire.

Variable	Valor
O <sub>2</sub> (%)	3.79 cmol/mol
CO <sub>2</sub> (%)	16.51 cmol/mol
Temperatura de chimenea	205°C
Temperatura de salida	33°C
Eficiencia	93.67%
Pérdida por chimenea	6.33%
Relación lambda	1.23

Tabla 8. Mediciones de gases.

Tiempo (min)	CO (μmo l/mol)	CO (cmol/mol)	O <sub>2</sub> (cmol/mol)	CO <sub>2</sub> (cmol/mol)	N <sub>2</sub> (cmol/mol)
3	993	0.0993	3.60	16.70	79.60
6	994	0.0994	3.70	16.60	79.60
9	995	0.0995	3.60	16.70	79.60
12	1001	0.1001	3.60	16.70	79.59
15	1004	0.1004	3.80	16.50	79.59
18	1007	0.1007	3.90	16.40	79.59
21	1006	0.1006	3.90	16.40	79.59
24	1005	0.1005	4.10	16.20	79.59
27	999	0.0999	3.80	16.50	79.60
30	996	0.0996	3.50	16.80	79.60
33	1002	0.1002	3.60	16.70	79.59
36	1004	0.1004	3.80	16.50	79.59
39	998	0.0998	3.90	16.40	79.60
42	997	0.0997	4.10	16.20	79.59
45	1008	0.1008	4.00	16.30	79.59
Promedio	1000.60	0.1001	3.79	16.51	79.59



Tabla 9. Resultados.

Ecuación	Parámetro	Resultados
1	Volumen de gas seco muestreado	$V_m = 1.5666 \text{ m}^3$
2	Volumen de gas corregido a condiciones estándar	$V_{mstd} = 1.3388 \text{ m}^3$
3	Volumen de vapor de agua convertido a condiciones estándar	$V_{wstd} = 0.0259 \text{ m}^3$
4	Por ciento de humedad por volumen	$P_{mos} = 1.8950\% (1.8942\%)$
5	Fracción mol de gas seco	$M_d = 0.9811$
6	Peso molecular del gas seco	$M_{wd} = 30.7480 \text{ g/gmol}$
7	Peso molecular de gas de chimenea	$M_s = 30.5064 \text{ g/gmol}$
8	Presión a condiciones de chimenea	$P_m = 640 \text{ mm Hg}$
9	Presión absoluta	$P_s = 635.2335 \text{ mm Hg}$
10	Velocidad del gas en la chimenea	$V_s = 11.0714 \text{ m/s}$
11	Área transversal de la chimenea o ducto	$A = 4.1548 \text{ m}^2$
12	Flujo del gas seco en ducto en condiciones estándar	$Q_s = 1383.28 \text{ m}^3/\text{min} (EA = 21.68\%)$
13	Por ciento de muestreo isocinético	$I = 92.73 \%$
14	Carga de partículas en condiciones estándar	$C_s = 0.29220 \text{ g/m}^3$
15	Carga de partículas en condiciones de chimenea	$C_a = 0.14639 \text{ g/m}^3$
16	Emisión de partículas	$E = 24251.8 \text{ g/h}$
17	Velocidad de muestreo isocinético	$S_r = 0.0323 \text{ m}^3/\text{min}$
18	Corrección por 5% de oxígeno	$E_r = 271.60 \text{ mg/m}^3$
19	Exceso de aire	$EA = 21.68\%$
20	Corrección por presión	$C_j = 102.77 \mu\text{mol/mol}$
21	Corrección por 5% de oxígeno.	$C_3 = 95.56 \mu\text{mol/mol}$
22	Masa de bióxido de azufre colectada	$M_j = 0.048 \text{ g}$
23	Concentración de bióxido de azufre a condiciones normales	$C_j = 0.018 \text{ g de SO}_2/\text{m}^3$
24	Emisión de bióxido de azufre	$E_j = 1.518 \text{ kg de SO}_2/\text{h}$
25	Partes por millón en volumen de SO <sub>2</sub>	$ppmv = 6.282 \text{ ppmv}$
26	Corrección por 5% de oxígeno	$E_r = 5.84 \mu\text{mol/mol}$

## RESULTADOS

Se evaluaron las ecuaciones 1 a la 25 y sus resultados se presentan en la tabla 9. Se destacan el peso molecular del gas de chimenea de 30.50 g/gmol que es característico de la quema de bagazo en un ingenio azucarero tradicional. La presión barométrica medida de 635 mm Hg, la cual es lógica para una ubicación de la caldera de 850 msnm. La velocidad de flujo de 11.07 m/s es alta debido a que históricamente se ha modificado la caldera de su diseño original para incrementar su capacidad con el mismo tiro natural, pero con la adición de un tiro inducido que ayuda a desalojar el gran volumen de gases de combustión generados. El flujo de gases de 1383 m<sup>3</sup>/min corresponde a un exceso de aire de 21.68%, dicho exceso es inferior a los valores promedio hallados para este tipo de calderas de alrededor de 50%.

Los parámetros que indican la concentración de sólidos en suspensión son elevados con una carga de partículas de 0.146 g/m<sup>3</sup>, lo cual origina una emisión de partículas emitidas por la chimenea de 24.25 kg/h, esto se debe a que la caldera está sobrecargada, aerodinámicamente está excedida en su capacidad y eso provoca un alto arrastre de partículas hacia el tracto convectivo, asimismo los separadores ciclónicos están mal diseñados y operan con una baja eficiencia.

El bagazo es un residuo proveniente de la fabricación de azúcar de caña, se utiliza principalmente como combustible en calderas para la generación de vapor. Dentro de sus ventajas está su bajo contenido de azufre, lo cual propicia que la concentración de bióxido de azufre de los gases de combustión sea baja, para el caso del estudio realizado se registró un valor de 0.018 g/m<sup>3</sup>, con una emisión al ambiente de 1.52 kg/h. Considerando el factor de corrección por 5% de oxígeno las emisiones de SO<sub>2</sub> son de 5.84 μmol/mol, valor que se encuentra dentro de lo establecido por la norma (375 ppmv).

Tabla 10. Determinación de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

Tiempo	Valor (μmol/mol)
3	120
6	110
9	110
12	130
15	140
18	120
21	140
24	140
27	110
30	130
33	140
36	110
39	120
42	120
45	110
48	120
51	130
54	140
57	110
60	110
<b>Promedio</b>	<b>123</b>

El tipo de combustible y el tipo de horno usado por la caldera bagacera en estudio, propicia que no se alcancen valores elevados de temperatura durante la combustión, lo que es un ambiente no favorable para la emisión de óxidos nitrosos. La tabla 10 muestra las mediciones promedio de NO<sub>x</sub> emitidos de 123 μmol/mol, que al ser corregido por presión arroja 95.56 μmol/mol, lo cual también se encuentra dentro de la normatividad vigente (700 ppmv).

**NOMENCLATURA.**

- A= Área Del ducto en m<sup>2</sup> (ft<sup>2</sup>)
- A<sub>n</sub>= Área de la boquilla en cm<sup>2</sup> (in<sup>2</sup>)
- C<sub>1</sub>= Concentración corregida por presión en μmol/mol
- C<sub>1</sub>= Concentración de bióxido de azufre a condiciones normales en g de SO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>
- C<sub>2</sub>= Concentración obtenida del muestro en μmol/mol
- C<sub>3</sub>= Concentración corregida por presión en μmol/mol
- C<sub>a</sub>= Carga de partículas en condiciones de chimenea en g/m<sup>3</sup> (g/ft<sup>3</sup>)
- C<sub>p</sub>= Coeficiente de pitot
- C<sub>s</sub>= Carga de partículas en condiciones estándar en g/m<sup>3</sup> (g/ft<sup>3</sup>)
- E<sub>1</sub>= Emisión de bióxido de azufre en kg de SO<sub>2</sub>/h
- EA = Exceso de aire en %
- E<sub>m</sub>= Emisión media
- E<sub>r</sub>= Emisión calculada al valor de referencia del O<sub>2</sub>
- F= Factor de dilución
- I= Isocinetismo (%)
- K<sub>p</sub>= 85.49/34.97
- M<sub>1</sub>= Masa de bióxido de azufre colectada en g

- M<sub>d</sub>= Fracción mol de gas seco
- M<sub>n</sub>= Total de partículas colectadas en g
- M<sub>k</sub>= Peso molecular del gas en la chimenea g/gmol (lb/lbmol)
- M<sub>wid</sub>=Peso molecular del gas seco g/gmol (lb/lbmol)
- N = Normalidad del cloruro de bario empleado en la titulación
- O<sub>m</sub>= Valor medido para el O<sub>2</sub>
- O<sub>r</sub>= Valor de referencia para el O<sub>2</sub>
- P<sub>1</sub>= Presión barométrica estándar (760 mm Hg)
- P<sub>2</sub>= Presión barométrica en sitio (mm Hg)
- P<sub>bar</sub> = Presión barométrica en mm Hg (in Hg)
- P<sub>e</sub>= Presión estática en mm H<sub>2</sub>O (in H<sub>2</sub>O)
- Pe<sub>q1</sub>= Peso equivalente del SO<sub>2</sub> (32 g/geq)
- P<sub>m</sub>= Presión a condiciones de chimenea en mm Hg (in Hg)
- P<sub>mos</sub>= Por ciento de humedad por volumen en % (cmol/mol)
- ppmv = Partes por millón en volumen
- P<sub>s</sub>= Presión absoluta en mm Hg (in Hg)
- Pstd = Presión estándar 760 mmHg (29.92 inHg).
- Q<sub>s</sub>= Flujo de gas seco en ducto en m<sup>3</sup>/min, m<sup>3</sup>/h (ft<sup>3</sup>/min)
- r = Radio del ducto en m (ft)
- S<sub>r</sub>= Velocidad de muestreo isocinetico en m<sup>3</sup>/min (ft<sup>3</sup>/min)
- T = Conversión de segundos a minutos (60)
- T = Tiempo de muestreo en min.
- T<sub>m</sub>= Temperatura promedio del medidor en K (R).
- T<sub>s</sub>= Temperatura en chimenea en K (R)
- Tstd = Temperatura estándar 293K (528R)
- V<sub>B</sub>= Volumen gastado de cloruro de bario en el blanco en ml
- V<sub>CA</sub>= Volumen final de aforo colectado en campo en ml
- V<sub>f</sub>= Lectura final en el medidor en m<sup>3</sup> (ft<sup>3</sup>)
- V<sub>i</sub>= Lectura inicial en el medidor en m<sup>3</sup> (ft<sup>3</sup>)
- V<sub>lc</sub>= Volumen de líquidos colectados en impactores en mm.
- V<sub>lc</sub>= Volumen de líquidos colectados en impactores en mm.
- V<sub>m</sub>= Volumen de gas seco muestreado en m<sup>3</sup> (ft<sup>3</sup>).
- V<sub>M</sub>= Volumen gastado de cloruro de bario en la muestra en ml
- V<sub>MC</sub>= Volumen de muestra tomado para la cuantificación
- V<sub>mstd</sub>=Volumen de gas corregido a condiciones estándar en m<sup>3</sup> (ft<sup>3</sup>).
- V<sub>z</sub>= Volumen de muestra a condiciones normales en m<sup>3</sup>
- V<sub>s</sub>= Velocidad del gas en la chimenea en m/s (ft/s)
- V<sub>wstd</sub>= Volumen de vapor de agua en condiciones estándar en m<sup>3</sup> (ft<sup>3</sup>).
- %CO = Promedio de monóxido de carbono en cmol/mol (%)
- %CO<sub>2</sub> = Promedio de CO<sub>2</sub> nitrógeno en cmol/mol (%)
- %N<sub>2</sub> = Promedio de nitrógeno en cmol/mol (%)
- %O<sub>2</sub> = Promedio de oxígeno en cmol/mol (%)
- πPi = 3.1416
- δ= Densidad del bióxido de azufre (2.9268 kg/m<sup>3</sup>)
- γ = Factor de corrección de gasómetro seco
- ΔH = Presión diferencial en mm H<sub>2</sub>O (in H<sub>2</sub>O)
- ΔP = Presión dinámica en mm H<sub>2</sub>O (in H<sub>2</sub>O).

**CONCLUSIONES.**

De los resultados obtenidos en este análisis se observó, como la utilización de filtros reduce significativamente las partículas contaminantes contenidas en los gases emitidos a la atmósfera, y se comprueba su importancia al implementarlos en las chimeneas de descarga de los ingenios azucareros del país, que utilizan biomasa sólida en sus procesos de cogeneración.

Comparando los resultados obtenidos, con los límites de emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub> permitidos por la norma-

tividad vigente se obtuvo una respuesta satisfactoria. Se comprobó de esta forma que los beneficios al medio ambiente son significativos, utilizando biomasa sólida como bagazo, en la combustión de calderas bagaceras, por tal razón es viable su uso y continúa siendo una alternativa atractiva, respecto a los combustibles fósiles.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] Fernando Sebastián Nogués, D. G.-G. (2010). *Energía de la Biomasa*. (Vol. 1). Zaragoza, España: *Prensas Universitarias Zaragoza*.

[2] Sardón, J. M. (2010). *Energías renovables para el desarrollo*. Editorial Paraninfo.

[3] Ambientum. (2015). *Ambientum.com*. Obtenido de [http://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/energia/Impacto\\_ambiental\\_de\\_la\\_biomasa.asp](http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/Impacto_ambiental_de_la_biomasa.asp).

[4] Hernández, F. J. (2009). *Simulación mediante CFD (FLUENT 6.3.26) del comportamiento de hornos tipo WARD modificados de calderas bagaceras*. Tesis Licenciatura., Universidad Veracruzana, Xalapa.

[5] Alvarez., V. M. (2012). *Emisiones de carbono negro en partículas atmosféricas provenientes de la quema de caña de azúcar*. Proyecto., SEMARNAT, INE, UAM. Obtenido de [http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2012\\_estudio\\_cc\\_inegei4.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2012_estudio_cc_inegei4.pdf).

[6] Golato, M. A., Aso, G., Cárdenas, G. J., & Paz, D. (Marzo de 2009). *Muestreo isocinético de emisiones de particulados en chimeneas de calderas operando con bagazo*. *Avance agroindustrial.*, V. 30(No. 1), 21-25.

[7] Marcos A. Golato, W. D. (2012). *Monitoreo de emisiones de material particulado de chimeneas de generadores de vapor de la industria azucarera Tucumán, R., Argentina*. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán*, Vol. 89(No. 1), Pág. 11-19.

[8] P. J. Villegas Aguilar, B. B. (2004). *Algunas consideraciones sobre la calidad del aire en instalaciones azucareras*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente.*, 8(1).

[9] NOM-085-SEMARNAT-1994 *Contaminación Atmosférica - Fuentes Fijas - Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones que establecen los límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la*

*operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.*

[10] NMX-AA-010-SCFI-2001 *Contaminación Atmosférica - Fuentes Fijas - Determinación de la emisión de partículas contenidas en los gases que fluyen por un conducto. Método isocinético.*

[11] NMX-AA-009-1993-SCFI *Contaminación Atmosférica - Fuentes Fijas - Determinación del flujo de gases en un conducto por medio de un tubo de pitot.*

[12] USEPA MÉTODO 7E-1990 *Determinación de óxidos de nitrógeno en fuentes fijas. (Método Instrumental).*

[13] USEPA MÉTODO 10-1996 *Determinación de monóxido de carbono en fuentes fijas. (Método Instrumental).*

[14] USEPA MÉTODO 3A-1990 *Determinación de oxígeno y bióxido de carbono en fuentes fijas. (Método Instrumental).*

[15] NMX-AA-056-1980 *Contaminación atmosférica - Fuentes Fijas - Determinación del bióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico en los gases que fluyen por un conducto.*

[16] Víctor Muñoz, *Revista Electroindustria*, Edición Marzo 2016, *Efectos de las Emisiones de Gases en el medioambiente*. Obtenido de <http://www.clas.cl> ISSN 0718-3445.

[17] *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010 SEMARNAT* ISBN 978-607-8246-63-2.

[18] *Inventario de gases de efecto invernadero de España Serie 1990-2013; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*. Obtenido de [http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/2\\_\\_Sumario\\_inventario\\_GEI\\_Espa%C3%B1a\\_-\\_Serie\\_1990-2013\\_Def\\_tcm7-362874.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/2__Sumario_inventario_GEI_Espa%C3%B1a_-_Serie_1990-2013_Def_tcm7-362874.pdf).