

## **CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PROCEDENTES DE CENTRALES AZUCAREROS AVILEÑOS**

### **ATMOSPHERIC CONTAMINANTS FROM AVILEAN SUGAR CENTERS**

**Autores:** Dr.C. Anel Hernández-Garces<sup>1</sup>

MSc. Mirtha Reinoso Valladares<sup>2</sup>

Lic. Francisco Hernández Bilbao<sup>3</sup>

**Institución:** <sup>1</sup>Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

<sup>2</sup>Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas, La Habana

<sup>3</sup>Azcuba, La Habana

**Correo electrónico:** [anel@quimica.cujae.edu.cu](mailto:anel@quimica.cujae.edu.cu)

## **RESUMEN**

La introducción de bioeléctricas con bagazo como combustible pudiera solucionar uno de los problemas más importantes en la actualidad: la contaminación ambiental. Este trabajo estima el SO<sub>2</sub>, los NO<sub>x</sub> y el MP emitidos por generadores de vapor de centrales azucareros de la provincia Ciego de Ávila mediante factores de emisión como precedente para la futura evaluación de las bioeléctricas. Como resultado se obtuvieron valores de emisión inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos para varios órdenes superiores que los de los generadores de vapor convencionales que emplean hidrocarburos como combustible. La verificación de las emisiones con las EMA de la NC/TS 803: 2010, para la categoría de Fuentes existentes comprobó que para el MP y los NO<sub>x</sub> de todas las chimeneas superan los valores legales. Mientras, para el SO<sub>2</sub> ninguna de las emisiones sobrepasa el máximo fijado.

**Palabras clave:** Emisiones, Central azucarero, Contaminantes atmosféricos, Generador de vapor.

## **ABSTRACT**

Introduction of bioelectric with bagasse as fuel could solve one of the most important problems at present: atmospheric pollution. This work estimates SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and PM emitted by steam boilers from sugar mills in the province of Ciego de Ávila using emission factors

as a precedent for the future evaluation of bioelectrics. As a result, lower emission levels were obtained than thermoelectric but several orders higher than those of conventional steam boilers that use hydrocarbons as fuel. Verification of the emissions with the EMA of the NC/TS 803: 2010, for the category of Existing Sources verified that for the MP and the NO<sub>x</sub>, all the chimneys exceed the legal values. Meanwhile, for the SO<sub>2</sub> none of the emissions exceeds the fixed maximum.

**Keywords:** Emissions, Sugar mill, Air pollutants, Steam boiler.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire constituye hoy uno de los principales problemas ambientales del mundo debido a la quema indiscriminada de hidrocarburos para la producción de energía. Una posible solución pudiera ser la diversificación de la matriz energética a partir del fomento del uso de energías renovables. En este sentido, puede ser considerada la agroindustria cañera ya que ofrece un potencial atractivo como fuente de cogeneración de energía eléctrica mediante la quema de bagazo (Nova González, 2013). Conforme a esto, en junio de 2014 fue aprobado la Política de Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía en Cuba, que estableció entre otros objetivos, la instalación de 755 MW en bioeléctricas. Luego, González-Corzo (2015) reportó una potencialidad anual de 5 000 GWh y analizó 5 alternativas de implementación. Paralelamente con Torres et al. (2015) demostraron la factibilidad económica del empleo de los subproductos de la caña de azúcar como el bagazo y otros residuales de la cosecha pueden ser por las plantas bioeléctricas en la producción de energía así como otros residuos de origen forestal o agrícola.

Otros países azucareros utilizan el bagazo como combustible. Bocchi y Oliveira (2008) señalaron que el bagazo era la biomasa más utilizada para la generación de vapor. Mientras, Shah (2016) ejemplificaron al bagazo de la caña de azúcar como un combustible alternativo capaz de minimizar las emisiones contaminantes en comparación con los hidrocarburos.

Domenech-López, et al. (2011) aclaran que no obstante, al quemar biomasa cañera, las bioeléctricas emiten gases contaminantes. Siempre existe este peligro, está presente y depende, entre otros del estado técnico de las calderas, de la existencia de sistemas de tratamiento y de la composición del combustible.

Numerosos investigadores han abordado el cálculo de emisiones provenientes de la quema del bagazo. A partir de estudios de laboratorio de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, Gadi et al. (2003) obtuvieron factores de emisión de varios biocombustibles y concluyeron que el bagazo tiene los menores valores para SO<sub>2</sub>. No obstante, para los NO<sub>x</sub> se obtuvieron los mayores valores. Más tarde, DIGESA (2005) precisó que el 73,7% de las emisiones de óxidos de nitrógeno del Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas de la Cuenca Atmosférica de la ciudad peruana de Trujillo es atribuida a la industria azucarera, con 162 t/año, debido en su totalidad a la combustión del bagazo de caña de azúcar. A la misma vez, Gil (2005) evaluó los efectos ambientales que produce la generación de energía a partir de bagazo en el central espirituano Melanio Hernández y utilizó el software DECADES para obtener factores de emisión.

Posteriormente, Kawashima et al. (2015) presentaron el inventario de emisiones sobre la base de las plantas de energía que queman bagazo de la caña de azúcar, uno de los combustibles utilizados con mayor frecuencia para generar electricidad en Brasil cuyo uso se ha acrecentado paulatinamente para satisfacer la demanda de energía. Recientemente, Hernández; et al. (2016) estimaron las emisiones provenientes de los centrales azucareros de la provincia de Mayabeque utilizando factores de emisión.

Este trabajo se propone como objetivo a partir de la discusión anterior, estimar mediante factores de emisión los contaminantes atmosféricos (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y MP) emitidos por las calderas de centrales azucareros avileños como antecedente para la futura evaluación de las emisiones de las bioeléctricas.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Fueron elegidos los generadores de vapor de los centrales de la provincia Ciego de Ávila por ser la que cuenta con uno de los centrales que posee la chimenea más alta de la industria azucarera: el Ciro Redondo, para sentar las bases de la evaluación de las futuras bioeléctricas.

Se estimaron los contaminantes atmosféricos a partir de la ecuación (1), recomendada por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA, 1998) y se utilizaron los factores de emisión publicados por esta agencia en la serie AP 42 para fuentes puntuales o estacionarias (EPA, 1993).

$$E = A \cdot f \cdot \left[ 1 - \frac{\varepsilon}{100} \right]$$

Donde  $E$  es la emisión (g/s),  
 $A$  es el consumo de combustible (kg/s),  
 $f$  es el factor de emisión no controlada (g/kg), y,  
 $\epsilon$  es la eficiencia de reducción de emisiones (%), cuando se utiliza tecnología de reducción. Como no existe tecnología de reducción de emisiones, entonces  $\epsilon=0$ .

La EPA (1993) ignora al  $SO_2$ , no obstante se incluye en el presente trabajo debido a la importancia de este contaminante criterio. Con este fin se considera entonces el factor de emisión reportado por NPI (2001) para el  $SO_2$ . Los factores de emisión tenidos en cuenta en el estudio se muestran en las Tablas 1 y 2.

Sustancia	Factor de emisión (g/kg bagazo)
MP	7,8
$NO_x$	0,6

Tabla 1: Factores de emisión (EPA, 1993)

Sustancia	Factor de emisión (g/kg bagazo)
$SO_2$	0,25

Tabla 2: Factores de emisión (NPI, 2001)

Diferentes autores describen una composición similar para el bagazo en la que subestiman la composición de azufre ya que las emisiones de  $SO_2$  provenientes de la quema de bagazo son escasas (EPA, 1993). La Tabla 3 muestra la composición elemental reportada.

Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre	Fuente
19,2 %	2,6 %	0,15	<0,1 %	EPA, (1993)
42,2	5,47	0,23	0,0	Manals-Cutiño et al., (2015)
42,54	5,17	0,63	0,3	Oliva y Antolín, (2003)
47,0	6,5	-	0,0	Reyes et al., (2003)

44,6	5,8	0,6	0,1	Hassuani et al., (2005)
------	-----	-----	-----	-------------------------

Tabla 3: Composición elemental del bagazo.

A partir de la norma potencial de caña del central (Tabla 4) y suponiendo que la misma generaba un 27% de bagazo, se estimó la cantidad de bagazo quemado.

Central/Municipio	# de chimeneas	# de calderas	Consumo de caña (t/h)
Enrique Varona	1	2	4 500
Ecuador	2	4	5 500
Ciro Redondo	2	4	6 000
Primero de Enero	1	2	4 600

Tabla 4: Consumo de caña de los centrales

Posteriormente, se sustrajo un 8%, cantidad retenida por la casa de bagazo para un futuro arranque de la caldera (Tabla 5).

Central	Consumo de bagazo (t/h)	Temperatura salida gases de combustión (K)
Enrique Varona	188	503
Ecuador	229	431
Ciro Redondo	250	523
Primero de Enero	192	488

Tabla 5: Consumo de caña de las calderas

Se promedió la temperatura de salida de los gases de combustión ya que algunos centrales poseen más de una caldera que emiten a través de la misma chimenea.

El consumo combustible, en kg/s, se determinó a partir de la masa de combustible gastado calculada anteriormente. Por otro lado, el flujo de gases se obtuvo por medio de la ecuación (2):

$$Q = V \cdot C \quad 2$$

Donde Q es el flujo de los gases de combustión (m<sup>3</sup>/s),

V es el volumen de gases húmedos ( $m^3/kg$ ), para condiciones normales ( $0\text{ }^\circ\text{C}$  y  $760\text{ mmHg}$ ), y,

C es el consumo de combustible en  $kg/s$ .

Mientras, el volumen de gases V se determinó según la ecuación (3):

$$V = 22,4 \left[ \left( \frac{P_C}{12} + \frac{P_{H_2}}{2} + \frac{S}{32} - \frac{O_2}{32} \right) \frac{n}{0,21} + \frac{P_{H_2}}{2} + \frac{O_2}{32} \right] \quad 3$$

Donde  $P_C$ ,  $P_H$ ,  $P_S$  y  $P_O$  son las composiciones en tanto por uno de un combustible formado por carbono, hidrógeno, azufre y oxígeno, y,

n es el coeficiente de exceso de aire. En este caso  $n=1+\text{exceso de aire}$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 6 se muestran los resultados de las emisiones de los contaminantes atmosféricos producidos por las calderas estudiadas. Para el caso específico del central *Ciro Redondo*, se debe aclarar que los valores se reportan en una misma fila ya que tanto sus 4 calderas como sus 2 chimeneas son idénticas y están distribuidas 2 calderas por chimenea.

Central	Emisiones (g/s)			Flujo de gases ( $m^3/s$ )
	MP	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	
Enrique Varona	100,9	7,8	3,2	33,7
Ecuador chimenea 1	92,5	7,1	3,0	80,4
Ecuador chimenea 2	30,8	2,4	1,0	8,5
Ciro Redondo chimenea 1/2	67,3	5,2	2,2	46,7
Primero de Enero	103,2	7,9	3,3	33,4

Tabla 6: Emisiones y flujos volumétricos

Los resultados de caudal y emisión estimados son inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos pero son varios órdenes superiores que los de los generadores de vapor convencionales instalados en distintas industrias e instituciones de la región que emplean hidrocarburos como combustible (Cuesta et al., 2016). Los mayores valores se corresponden con los más altos consumos de bagazo.

Las Emisiones Máximas Admisibles (EMA) se han establecido en dependencia de las

características de las instalaciones. Los generadores de vapor estudiados en este trabajo se clasifican como c-1 (Calderas de vapor. Biomasa) según la norma NC/TS 803: 2010. Esta norma solo concierne a los contaminantes SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y material particulado.

Con el fin de realizar la verificación de las emisiones con esta norma, se convirtieron los valores de concentración de los contaminantes a unidades de mg/Nm<sup>3</sup>. Como resultado se obtuvo que todas las chimeneas sobrepasan los límites normativos para el MP y los NO<sub>x</sub> (Tabla 7). El mayor aporte, lógicamente es el MP, causado esencialmente por el empleo de bagazo como combustible. Por otro lado, ninguna de las emisiones resultantes de SO<sub>2</sub> sobrepasa la EMA establecidas en la norma cubana debido al bajo contenido de azufre en el bagazo quemado. Estas estimaciones deben ser validadas determinando el valor real de las emisiones con analizadores de gases de combustión.

Central	Emisiones (mg/Nm <sup>3</sup> )		
	MP	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
EMA Fuentes existentes	400	100	1000
Enrique Varona	2757,8	212,1	88,4
Ecuador chimenea 1	1838,6	141,4	58,9
Ecuador chimenea 2	5518,6	424,5	176,9
Ciro Redondo chimenea 1/2	2759,3	212,3	88,4
Primero de Enero	2758,3	212,2	88,4

Tabla 7: Comparación normativa de las emisiones

La dispersión puede ser creada por el aire fluyendo alrededor de obstáculos e irregularidades de la superficie por ejemplo colinas y árboles; o por la diferencia en la velocidad y/o dirección del viento entre dos alturas sobre la superficie o por burbujas de aire ascendiendo debido al calentamiento diurno de la superficie. La dispersión es un proceso de dilución que mezcla el aire ambiente con el penacho de partículas gobernado principalmente por la turbulencia atmosférica (López, 2006).

Producto de la dispersión, las emisiones estudiadas en este trabajo deben influir esencialmente en las zonas rurales para las que se supone un uso agrícola del suelo. No deben afectar a las comunidades vecinas a los centrales si se tiene en cuenta la altura de las chimeneas. El central Ciro Redondo posee una de las chimeneas más altas de la industria azucarera (83 m). La zona de influencia y los efectos de las inmisiones de los

contaminantes analizados pudiera estimarse a través de la modelación de la dispersión de estas emisiones (Hernández-Garces et al., 2015).

Deberá evaluarse alternativas de solución a la emisión de contaminantes. Torres et al. (2015) consideraron la gasificación del bagazo para la generación de electricidad, de forma limpia y altamente eficiente. Mientras, Ren et al. (2017) evaluaron el uso de la torrefacción del bagazo con la ulterior reducción de las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

## CONCLUSIONES

Se estimaron los contaminantes atmosféricos emitidos por los generadores de vapor de centrales azucareros avileños y arrojó como resultado valores de emisión varios ordenes mayor que los de los generadores de vapor convencionales que emplean hidrocarburos como combustible pero inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos. El cotejo de las emisiones con las EMA de la NC/TS 803: 2010, para la categoría de Fuentes existentes demostró que para el MP y los NO<sub>x</sub> de todas las chimeneas superan los valores legales. Sin embargo, para el SO<sub>2</sub> ninguna de las emisiones sobrepasa el máximo fijado.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- BOCCHI, B. Y OLIVEIRA, S.: *Estudo de viabilidade de cogeração de uma unidade de extração de óleo de palma integrada a uma usina de biodiesel*, PME 2600 - Projeto integrado III, Trabalhos de formatura engenharia mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pp. 10, 2008.
- CUESTA SANTOS, O.; SOSA PÉREZ, C.; IRAOLA RAMIREZ, C.; MENÉNDEZ RODRÍGUEZ, L.; GONZÁLEZ JAIME, Y.; NUÑEZ CARABALLO, V.; FONTE HERNÁNDEZ, A.; IMBERT LAMORÚ, C.; BARCIA SARDIÑAS, S.; GÓMEZ ZAMORA, Y.; PORTAL CASTILLO, D. Y COLLAZO ARANDA, A.: *Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas*. CITMA/AMA/Instituto de Meteorología. Resultado Científico, Resumen ejecutivo, La Habana, pp. 20, 2016.
- Dirección general de salud ambiental [DIGESA]: *Inventario de emisiones de fuentes fijas cuenca atmosférica de la ciudad de Trujillo*, Perú, 2005.
- DOMENECH-LÓPEZ, F.; LORENZO-ACOSTA, Y.; LORENZO-IZQUIERDO, M. Y ESQUIVEL-BARÓ, L.: «Diagnóstico preliminar de las emisiones gaseosas en la industria de los derivados de

la caña de azúcar», en *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, 45(3), 30–37, 2011.

Environmental Protection Agency [EPA]: *Emission factor documentation for AP-42*, section 1.8 Bagasse combustion in sugar mills, 1993.

Environmental Protection Agency [EPA]: *Emissions Factors & AP-42*, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, 1998.

GADI, R.; KULSHRESTHA, U.C.; SARKAR, A.K.; GARG, S.C. Y PARASHAR, D.C.: «Emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from biofuels in India», en *Tellus B*, 55(3), pp. 787-795, 2003.

GIL UNDAY, Z.: *Estudio del impacto ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en Cuba, Estudio de caso Melanio Hernández*, Tesis de Doctorado, Universidad de Girona, 2005.

GONZÁLEZ CORZO, M.: *La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes*, Bildner Center, 2015.

HASSUANI, S.J.; LIMA, M.R. Y CARVALHO, I.: *Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash*, en PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento CTC - Centro de Tecnologia Canaveira, 1st edition, 2005

HERNÁNDEZ GARCÉS, A.; JAUREGUI HAZA, U.; SOUTO GONZÁLEZ, J.; CASARES LONG, J.; SAAVEDRA RODRÍGUEZ, S.; GUZMÁN MARTÍNEZ, F. Y TORRES VALLE, A.: «Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones», en *UCE Ciencia Revista De Postgrado*, 3(2), 201.

HERNÁNDEZ GARCÉS, A.; REINOSA VALLADARES, M.; ORDOÑEZ, Y.C.; BARCELONA, L. Y HERNÁNDEZ, F.: «Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros», en *Ecosolar*, 56, 1-7, 2016.

KAWASHIMA, A.B.; DE MORAIS, M. V. B.; MARTINS, L.D.; URBINA, V.; RAFEE, S. A. A.; CAPUCIM, M.N. Y MARTINS, J.A.: «Estimates and Spatial Distribution of Emissions from Sugar Cane Bagasse Fired Thermal Power Plants in Brazil», en *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 3(6), 72-76, 2015.

LÓPEZ, C.: «Introducción a la gestión de la calidad del aire», en *Modelación de la calidad del aire*, Instituto de Meteorología, 2006.

MANALS CUTIÑO, M.; PENEDO-MEDINA, M. Y SALAS TORT, D.: «Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal», en *Tecnología Química*, 35(2), 244-255, 2015.

National Pollutant Inventory [NPI]: *Emission estimation technique manual for Combustion in boilers*, Version 3.6, 2001.

NC/TS 803: *Calidad del aire emisiones máximas admisibles, en De contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor*, Oficina Nacional de Normalización, 2010.

NOVA GONZÁLEZ, A.: «Importancia económica y estratégica de la agroindustria de la caña de azúcar para la economía cubana», en *Transforming The Cuban Economic Model*, Bildner Center for Western Hemisphere Studies, The Graduate Center, CUNY, New York, 2013.

OLIVA, D. Y ANTOLÍN, G.: «Aproximación experimental a la combustión del bagazo de caña en lecho fluidizado», en *Ecosolar*, 3, 1-5, 2003.

REN, X.; SUN, R.; MENG, X.; VOROBIEV, N.; SCHIEMANN, M. Y LEVENDIS, Y.A.: «Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass», en *Fuel*, 188, 310-323, 2017.

REYES, J.L.; PEREZ, R. Y BETANCOURT, J.: «Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental», en *Ecosolar*, 5, 1-7, 2003.

SHAH, S.A.; SOOMAR, M. Y HUSSAIN, A.: «Comparative Emission Analysis Of Bituminous Coal, Sugarcane Bagasse and Rice Husk», en *Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series)*, 48(3), 2016.

TORRES, A.; ALMAZÁN, O. Y HERNÁNDEZ, B.: «Estudio de factibilidad económica de un proyecto de generación eléctrica, a partir de la gasificación de bagazo en un central azucarero cubano», en *Centro Azúcar*, 42(1), 1-8, 2015.