

REDEL. Revista Granmense de Desarrollo Local  
Vol.2 No.1, enero- marzo 2018. RNPS: 2448. [redel@udg.co.cu](mailto:redel@udg.co.cu)

## ORIGINAL

# EMISIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PROVENIENTES DE CENTRALES AZUCAREROS GRANMENSES

Emission of air pollutants from sugar mills of Granma

Dr. C. Anel Hernández-Garcés, Profesor Auxiliar, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), [anel@quimica.cujae.edu.cu](mailto:anel@quimica.cujae.edu.cu), Cuba

M. Sc. Mirtha Reinos-Valladares, Investigadora Agregada, Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas, [mirtha@inor.ciiq.minem.cu](mailto:mirtha@inor.ciiq.minem.cu), Cuba

Lic. Francisco Hernández Bilbao, Especialista Superior en Termo-energética, IPROYAZ, [francisco.bilbao@iprojaz.azcuba.cu](mailto:francisco.bilbao@iprojaz.azcuba.cu), Cuba

Recibido: 20/12/2017- Aceptado: 25/01/2018

## RESUMEN

Actualmente, uno de los problemas ambientales más importantes es la contaminación atmosférica. Este pudiera solucionarse con la introducción de bioeléctricas con bagazo como combustible. En este trabajo se estima el SO<sub>2</sub>, los NO<sub>x</sub> y el MP provenientes de los generadores de vapor de centrales azucareros de la provincia Granma mediante factores de emisión como precedente para la evaluación ulterior de las bioeléctricas. Como resultado se obtuvieron valores de emisión inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos por varios órdenes superior que los de los generadores de vapor convencionales que emplean hidrocarburos como combustible. La comprobación de las emisiones con las EMA de la NC/TS 803: 2010, para la categoría de Fuentes existentes patentizó que para el MP y los NO<sub>x</sub> de todas las chimeneas se superan los máximos legales. Mientras, para el SO<sub>2</sub> ninguna de las emisiones excede el valor fijado.

**Palabras clave:** Emisiones, central azucarero, contaminantes atmosféricos, generador de vapor.

## ABSTRACT

At present, one of the most important problems is the atmospheric pollution. That could be solved through the introduction of bioelectric with bagasse as fuel. In this work SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and PM emitted by steam boilers from sugar mills in the province of Granma were estimated 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. Checking of the emissions with the EMA of the NC/TS 803: 2010, for the Existing Sources category made evident that for the MP and the NO<sub>x</sub>, all the chimneys exceed the legal maximums. Nevertheless, for the SO<sub>2</sub> none of the emissions exceeds the fixed value.

**Key words:** Emissions, sugar mill, air pollutants, steam boiler.

## **INTRODUCCIÓN**

La contaminación del aire debido a la quema indiscriminada de hidrocarburos para la producción de energía es uno de los problemas ambientales más críticos del mundo. Esto pone de manifiesto la necesidad de profundizar en el conocimiento del impacto ambiental que provocan los contaminantes, su prevención y control, así como en el establecimiento de medidas que reduzcan los niveles de contaminación para lograr un desarrollo sostenible.

La diversificación de la matriz energética, producto del desarrollo del uso de energías renovables, pudiera ser una opción. En ese sentido, puede ser tomada en cuenta la agroindustria cañera ya que brinda un potencial atractivo como fuente de cogeneración de energía eléctrica mediante la quema de bagazo (Nova González, 2013). Como consecuencia, fue aprobada la Política de Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía en Cuba en junio de 2014 que propuso, entre otros, la instalación de 755 MW en bioeléctricas.

Igualmente, González-Corzo (2015) estimó una potencialidad anual de 5 000 GWh y evaluó 5 alternativas de ejecución. A la par, Torres et al. (2015) demostraron la viabilidad económica del uso de los subproductos de la caña de azúcar como el bagazo y otros residuales de la cosecha que pueden ser empleados por las plantas bioeléctricas en la producción de energía así como otros residuos de origen forestal o agrícola. Adicionalmente, Centeno (2015) destaca que un eventual aumento en la producción de energía a partir de bagazo podría, en muchos casos, significar un aumento en la producción de azúcar. Mientras, Jiménez et al. (2017) analizaron los esquemas termo-energéticos de dos centrales de la provincia de Cienfuegos y evaluaron la posibilidad de incrementar la electricidad vendida al Sistema Eletroenergético Nacional.

En otros países el bagazo se emplea igualmente como combustible. Bocchi y Oliveira (2008) reportaron que el bagazo era la biomasa más utilizada en Brasil para la generación de vapor. Por otra parte, Shah et al. (2016) pusieron de ejemplo al bagazo de la caña de azúcar como un

combustible alternativo capaz de reducir las emisiones contaminantes en comparación con los hidrocarburos.

No obstante, la quema de biomasa cañera no libra a las bioeléctricas de emitir gases contaminantes (Domenech-López et al., 2011). Siempre está presente este peligro y depende, entre otros, de la existencia de sistemas de tratamiento, del estado técnico de las calderas y de la composición de la biomasa.

Diversos investigadores han reportado las emisiones provenientes de la quema del bagazo. A partir de estudios de laboratorio de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , Gadi et al. (2003) obtuvieron factores de emisión de varios biocombustibles y comentaron que el bagazo tiene los menores valores para  $\text{SO}_2$ . Sin embargo, para los  $\text{NO}_x$  alcanzaron valores superiores. A continuación, DIGESA reportó 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 imputada a la industria azucarera, con 162 t/año, debido en su totalidad a la combustión del bagazo de caña de azúcar. Paralelamente, Gil (2005) evaluó los efectos ambientales que produce la generación de energía a partir de bagazo en el central espiritano Melanio Hernández y empleó el software DECADES para obtener factores de emisión.

Luego, Kawashima et al. (2015) confeccionaron el inventario de emisiones de las plantas de energía que consumen bagazo de la caña de azúcar en Brasil. Recientemente, Hernández-Garcés et al. (2016), (2017a), (2017b), (2017c), (2017d) y (2018), estimaron las emisiones provenientes de los centrales azucareros de la provincia de Mayabeque, Ciego de Ávila, Cienfuegos, Sancti Spiritus, Guantánamo y Camagüey utilizando factores de emisión. Mientras, otros investigadores han estimado las emisiones desde el punto de vista climático (Reinosa et al., 2017).

A partir de la discusión anterior se propone como objetivo de este trabajo estimar mediante factores de emisión los contaminantes atmosféricos ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y MP) emitidos por las calderas de centrales azucareros granmenses como precedente para la evaluación del impacto futuro de las emisiones de las bioeléctricas sobre la calidad del aire.

## **POBLACIÓN Y MUESTRA**

Fueron seleccionados los generadores de vapor de los centrales de la provincia Granma como antecedente de la evaluación de las futuras bioeléctricas.

A partir de la ecuación (1) recomendada por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA) se estudiaron los contaminantes atmosféricos emitidos y se usaron los

factores de emisión normalizados por esta agencia en la serie AP 42 para fuentes puntuales o estacionarias.

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

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,

v es la eficiencia de reducción de emisiones (%), cuando se utiliza tecnología de reducción. Como no existe tecnología de reducción de emisiones, entonces  $v = 0$ .

En este trabajo se considera al SO<sub>2</sub> pese a ser omitido por la EPA debido a la importancia de este contaminante criterio. Estos son aquellos con los que se establecen los niveles de calidad de aire y en los que se basan los documentos normativos. Se incluye entonces el factor de emisión sugerido por NPI(2001) para el SO<sub>2</sub>. En las Tablas 1 y 2 se muestran los factores de emisión tenidos en cuenta en el estudio.

Tabla 1. Factores de emisión (EPA, 1993).

Sustancia	Factor de emisión (g/kg bagazo)
MP	7,8
NO <sub>x</sub>	0,6

Tabla 2. Factores de emisión (NPI, 2001).

Sustancia	Factor de emisión (g/kg bagazo)
SO <sub>2</sub>	0,25

Debido a que las emisiones de SO<sub>2</sub> procedentes de la quema de bagazo son escasas (EPA, 1993), se reporta una composición similar para el bagazo en la que subestiman la composición de azufre. En la Tabla 3 se muestra la composición elemental reportada.

Tabla 3. Composición elemental del bagazo (%).

Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre	Fuente
19,2	2,6	0,15	<0,1	EPA, (1993)
44,6	5,8	0,6	0,1	Manals-Cutiño et al., (2015)
42,2	5,47	0,23	0,0	Oliva y Antolín, (2003)

42,54	5,17	0,63	0,3	Reyes et al., (2003)
47,0	6,5	-	0,0	Hassuani et al., (2005)

A partir de la norma potencial de caña del central (Tabla 4) y considerando que la misma generaba un 27% de bagazo, se estimó la cantidad de bagazo quemado. El estudio se realizó en la zafra 2016-2017.

Tabla 4. Consumo de caña de los centrales

Central/Municipio	# de chimeneas	# de calderas	Consumo de caña (t/h)
Arquímedes Colina/Bayamo	1	2	120
Roberto Ramírez/ Niquero	1	2	144
Bartolomé Masó/ Bartolomé Masó	1	2	146
Enidio Díaz Machado/ Campechuela	1	1	115
Grito de Yara/ Rio Cauto	1	3	229

Se sustrajo a continuación un 8%, cantidad almacenada en la casa de bagazo para un arranque posterior de la caldera (Tabla 5).

Tabla 5. Consumo de caña de las calderas

Central	Consumo de bagazo (t/h)	Temperatura salida gases de combustión (K)
Arquímedes Colina	30	523
Roberto Ramírez	36	473
Bartolomé Masó	36	473
Enidio Díaz Machado	29	483
Grito de Yara	57	456

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

El consumo combustible, en kg/s, se determinó teniendo en cuenta la masa de combustible gastado estimada anteriormente. Mientras, el flujo de gases se obtuvo por medio de la ecuación (2):

$$Q = V \cdot C$$

2

donde  $Q$  es el flujo de los gases de combustión ( $\text{Nm}^3/\text{s}$ ), para condiciones normales ( $0^\circ\text{C}$  y  $760\text{ mmHg}$ ),

$V$  es el volumen de gases húmedos ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ ) para condiciones normales, y,

$C$  es el consumo de combustible en  $\text{kg/s}$ .

Para calcular el volumen de gases  $V$ , se empleó la ecuación (3) con los valores reportados por la EPA:

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

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  $n=1+\text{exceso de aire}$ .

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados de las emisiones de los contaminantes atmosféricos, provocadas por las calderas evaluadas se muestran en la Tabla 6.

Los valores de caudal y emisión estimados son varios órdenes inferior que los de los generadores de vapor convencionales localizados en distintas industrias e instituciones de la región que emplean hidrocarburos como combustible, debido fundamentalmente al volumen bajo de combustible consumido por estos; pero son inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos (Cuesta et al., 2016). Neto y Ramón (2002) coinciden con esta conclusión alcuantificar las toneladas de  $\text{NO}_x$  dejadas de emitir por la quema de emisiones fósiles. Los valores más altos se corresponden además con los mayores consumos de bagazo.

Tabla6. Emisiones y flujos volumétricos

Central	Emisiones (g/s)			Flujo de gases ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
	MP	$\text{NO}_x$	$\text{SO}_2$	
Arquímedes Colina	64,5	5,0	2,1	44,8
Roberto Ramírez	77,4	6,0	2,5	48,6
Bartolomé Masó	78,5	6,0	2,5	49,3
Enidio Díaz Machado	61,9	4,8	2,0	19,9
Grito de Yara	123,3	9,5	4,0	114,6

Las Emisiones Máximas Admisibles (EMA) se han establecido en dependencia de las características de las instalaciones (NC/TS 803, 2010). Los generadores de vapor analizados en este estudio se clasifican como c-1 (Calderas de vapor. Biomasa). Esta norma solo regula los contaminantes SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y material particulado.

Para comparar las emisiones con la norma anterior, se convirtieron los valores de concentración de los contaminantes a unidades de mg/Nm<sup>3</sup>. Se obtuvo como resultado que todas las chimeneas sobrepasan los límites normativos para el MP y los NO<sub>x</sub> (Tabla 7). Naturalmente, el mayor aporte es del MP causado por el uso de bagazo como combustible. Por otro lado, ninguna de las emisiones de SO<sub>2</sub> supera la EMA establecida en la norma cubana debido al bajo contenido de azufre en el bagazo quemado. Estas estimaciones se deben validar determinando el valor real de las emisiones con analizadores de gases de combustión.

Tabla 7. Comparación normativa de las emisiones

Central	Emisiones (mg/Nm <sup>3</sup> )		
	MP	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
EMA Fuentes existentes	400	100	1000
Arquímedes Colina	2758,3	212,2	88,4
Roberto Ramírez	2758,3	212,2	88,4
Bartolomé Masó	2759,3	212,3	88,4
Enidio Díaz Machado	5514,5	424,2	176,7
Grito de Yara	1839,1	141,5	58,9

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

Las emisiones analizadas en este trabajo, como resultado de la dispersión, deben influir básicamente en zonas rurales para las cuales 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 área de influencia y los efectos de la inmisión de los contaminantes evaluados pudiera estimarse a través de la modelación de la dispersión de estas emisiones (Hernández-Garcés y otros, 2015; Ordoñez-Sánchez y otros, 2018).

Se deben considerar alternativas para la solución a la emisión de contaminantes. Padinger (2000) señaló que una reducción en el caudal volumétrico de aire primario conduce a una significativa reducción en la formación de  $\text{NO}_x$ . Luego, Neves (2005) concluyó que una disminución de un 20 % de exceso de aire, provoca una reducción de un 30 % en la formación de  $\text{NO}_x$  y sugirió filtros convencionales para partículas como las mangas y los ciclones. Luego, Torres et al. (2015) mencionaron la gasificación del bagazo como una opción limpia y altamente eficiente para la generación de electricidad. Por su parte, Renet et al. (2017) evaluaron la torrefacción del bagazo con la resultante reducción de las emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ . Mientras, para las partículas Cassula et al. (2015) propusieron el tratamiento de las emisiones con un lavador de gases.

## CONCLUSIONES

- Se analizaron los contaminantes atmosféricos procedentes de los generadores de vapor de centrales azucareros granmenses y se obtuvieron como resultado valores de emisión varios órdenes superior que los de los generadores de vapor convencionales que emplean hidrocarburos como combustible, pero inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos.
- La comparación de las emisiones con las EMA de la NC/TS 803: 2010, para la categoría de Fuentes existentes, corroboró que para el MP y los  $\text{NO}_x$  de todas las chimeneas, sobrepasan los valores legales. No obstante, para el  $\text{SO}_2$  ninguna de las emisiones sobrepasa el máximo fijado.

## AGRADECIMIENTOS

A los especialistas, a Andrés Rodríguez del Arquímedes Colina, a Rafael Almaguer del Roberto Ramírez, a Amalia Porto del Bartolomé Masó, a Vladimir Arias del Enidio Díaz y a Alexis del Grito de Yara; por el suministro de los datos y especificaciones con que se realizó este trabajo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bocchi B. y Oliveira, S. (2008). 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, 10 pp.
- Cassula, D. A., Zanzini, J. C., Dos Santos, J. y Da Silva, T. L. (2015). Estudo sobre a eficiência energética de fontes renováveis no Brasil: avaliação da utilização da biomassa da cana-de-açúcar na cogeração de energia elétrica no setor sucroenergético. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, ENGEMA XVII, São Paulo.
- Centeno, F. O. (2015). Avaliação da combustão de bagaço e palha de cana-de-açúcar numa fornalha de caldeira industrial AMD a partir da modelagem por CFD. (Doctorado). Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajuba, MG, Brasil.
- Cuesta, O, Sosa, C., Iraola, C., Menéndez, L., González, Y, Nuñez, V., Fonte, A., Imbert, C., Barcia, S., Gómez, Y., Portal, D. y Collazo, A. (2016). Inventario nacional de emisiones atmosféricas de las principales fuentes fijas. CITMA/AMA/Instituto de Meteorología. Resultado Científico, Resumen ejecutivo. La Habana, 20 pp.
- Domenech-López, F., Lorenzo-Acosta, Y., Lorenzo-Izquierdo, M. y Esquivel-Baró, L. (2011). Diagnóstico preliminar de las emisiones gaseosas en la industria de los derivados de la caña de azúcar. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, 45(3), 30–37.
- Gadi, R., Kulshrestha, U. C., Sarkar, A. K., Garg, S. C. y Parashar, D. C. (2003). Emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from biofuels in India. *Tellus B*, 55(3), 787-795.
- Gil Uday, Z. (2005). *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.
- González-Corzo, M. (2015). La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes. Bildner Center. Recuperado de <https://thecubaneconomy.com/articles/2015/12/la-agroindustria-canera-cubana-transformaciones-recientes/>
- Hernández-Garces, A., Reinoso, M. y Hernández, F. (2017). Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros avileños. *Universidad&Ciencia*, 6(2), 17-26.

- Jiménez, R., Lorenzo, J., Monteagudo, J. P., Pérez de Alejo, H., Álvarez, R. y Carreño, D. D. (2017). Potencialidades de entrega de energía eléctrica en dos centrales azucareros de la provincia de Cienfuegos. *Centro Azúcar*, 44(2), 60-68.
- Kawashima, A. B., de Morais, M. V. B., Martins, L. D., Urbina, V., Rafee, S. A. A., Capucim, M. N. y Martins, J. A. (2015). Estimates and Spatial Distribution of Emissions from Sugar Cane Bagasse Fired Thermal Power Plants in Brazil. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 3(6), 72-76.
- López. C. (2006). Introducción a la gestión de la calidad del aire. Modelación de la calidad del aire. Instituto de Meteorología.
- Neto, V. C. y Ramon, D. (2002). Análises de opções tecnológicas para projetos de co-geração no setor sucro-alcooleiro. Contract NO. DE-AC36-99GO10337, Brasília, DF.
- Neves, F. (2005). Caracterização e Controle das Emissões de Óxido de Nitrogênio e Material Particulado em Caldeiras para Bagaço. 2005. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil.
- Nova González, A. (2013). Importancia económica y estratégica de la agroindustria de la caña de azúcar para la economía cubana. Ponencia presentada en “Transforming The Cuban Economic Model.” Bildner Center for Western Hemisphere Studies, The Graduate Center, CUNY, New York.
- Ordoñez-Sánchez, Y. C., Reinos-Valladares, M., Hernández-Garcés, A., Canciano-Fernández, J. (2018). Aplicación de modelos simplificados para la dispersión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 90-103.
- Padinger, R. (2000). NO<sub>x</sub> reduction of biomass combustion by optimized combustion chamber design and combustion control. Proceedings of the conference ‘Developments in Thermochemical Biomass Conversion’, Seefeld, Austria.
- Shah, S. A., Soomar, M. y Hussain, A. (2016). Comparative Emission Analysis Of Bituminous Coal, Sugarcane Bagasse and Rice Husk. *Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series)*, 48(3), 685-688.