

Evaluación de las emisiones de contaminantes de centrales azucareros en Camagüey

Evaluation of pollutant emissions from sugar mills in Camagüey

Anel Hernández Garces¹, Mirtha Reinoso Valladares², Yan Carlos Ordoñez Sánchez² y Francisco Hernández Bilbao³.

¹ Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echevarría", La Habana. Cuba.

² Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas, La Habana. Cuba.

³ AZCUBA, La Habana. Cuba.

E – mail: anel@quimica.cujae.edu.cu.

Recibido: 23 de noviembre de 2017.

Aceptado: 18 de diciembre de 2017.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo estimar mediante factores de emisión los contaminantes atmosféricos (SO₂, NO_x y el material particulado) emitidos por las calderas de centrales azucareros de Camagüey, Cuba. Como resultado se obtuvieron valores de emisión inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos pero varios ordenes superior que los de los generadores de vapor convencionales que emplean hidrocarburos como combustible. La comprobación de las emisiones con las Emisiones Máximas Admisibles de la NC/TS 803: 2010, para la categoría de fuentes existentes evidenció que para el material particulado (MP) y los NO_x de todas las chimeneas se superan los máximos legales. No obstante, para el SO₂ ninguna de las emisiones sobrepasa el valor fijado. Por ello se propone la introducción de bioeléctricas con bagazo como combustible para contribuir a la reducción de la contaminación atmosférica.

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

Summary

The objective of this work is to estimate, through emission factors, the atmospheric pollutants (SO₂, NO_x and particulate matter) emitted by the sugarcane boilers of Camagüey, Cuba. As a result, lower emission values were obtained than those of thermoelectric and generator sets but several orders higher than those of conventional steam generators that use hydrocarbons as fuel. The verification of the emissions with the Maximum Allowable Emissions of the NC / TS 803: 2010, for the category of existing sources showed that for the particulate matter (PM) and the NO_x of all the chimneys the legal maximums are exceeded. However, for SO₂ none of the emissions exceeds the set value. Therefore, the introduction of bioelectric plants with bagasse as a fuel is proposed to contribute to the reduction of atmospheric pollution.

Keywords: emissions, sugar mill, air pollutants, steam boiler.

Introducción

La contaminación del aire constituye uno de los problemas ambientales más críticos del mundo debido a la quema indiscriminada de hidrocarburos para la producción de energía. Esto revela la

necesidad de ahondar en el conocimiento del impacto ambiental que provocan los contaminantes, su prevención y control, así como en el establecimiento de medidas que favorezcan la reducción de los niveles de contaminación en aras del desarrollo sostenible.

La diversificación de la matriz energética a partir del desarrollo del uso de energías renovables pudiera ser una solución. De tal modo, puede ser tenida en cuenta la agroindustria cañera ya que brinda un potencial atractivo como fuente de cogeneración de energía eléctrica mediante la quema de bagazo (Nova, 2013). En tal sentido, 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 estableció, entre otros propósitos, la instalación de 755 MW en bioeléctricas.

Además, González (2015) estimó una potencialidad anual de 5 000 GWh y evaluó 5 alternativas de ejecución. A la vez, Torres, Almazán y Hernández (2015) demostraron la viabilidad económica del empleo 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. Mientras, Jiménez y otros (2017) analizaron los esquemas termo-energéticos de dos centrales de la provincia de Cienfuegos y estimaron la posibilidad de incrementar la electricidad vendida al Sistema Eletroenergético Nacional.

El bagazo se aprovecha igualmente como combustible en otros países. Bocchi y Oliveira (2008) reportaron que el bagazo era la biomasa más utilizada en Brasil para la generación de vapor. Por otra parte, Shah, Soomar y Hussain (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.

Sin embargo, la quema de biomasa cañera no exime a las bioeléctricas de emitir gases contaminantes (Domenech, 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 SO₂ y NO_x, Gadi et al (2003) obtuvieron factores de emisión de varios biocombustibles y comentaron que el bagazo tiene los menores valores para SO₂. Sin embargo, para los NO_x obtuvieron valores superiores. Luego, DIGESA (2005) 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 atribuida 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 espirituano Melanio Hernández y empleó el software DECADES para obtener factores de emisión.

Luego, Kawashima et al (2015) elaboraron el inventario de emisiones de las plantas de energía que queman bagazo de la caña de azúcar en Brasil. Recientemente, (Hernández et al, 2016; Hernández-, Reinoso y Hernández, 2017a; Hernández, Reinoso y Hernández, 2017b; Hernández et al, 2017c) estimaron las emisiones provenientes de los centrales azucareros de la provincia de Mayabeque, Ciego de Ávila, Cienfuegos y Sancti Spíritus utilizando factores de emisión. Mientras, otros investigadores han calculado las emisiones con un enfoque ambiental (Reinoso, et al, 2017).

Atendiendo a la discusión anterior se propone como objetivo de este trabajo estimar mediante factores de emisión los contaminantes atmosféricos (SO₂, NO_x y MP) emitidos por las calderas de centrales azucareros camagüeyanos como precedente para la evaluación futura del impacto de las emisiones de las bioeléctricas sobre la calidad del aire.

Materiales y métodos

Fueron elegidos los generadores de vapor de los centrales de la provincia Camagüey por ser una de las provincias con más centrales para sentar las bases de la evaluación de las futuras bioeléctricas. Todos los datos empleados en el estudio se corresponden con la zafra 2016-2017. Según la ecuación (1) recomendada por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA, 1998). se evaluaron los contaminantes atmosféricos emitidos y se emplearon los factores de emisión divulgados por esta agencia en la serie AP 42 para fuentes puntuales o estacionarias (EPA, 1993).

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

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

En el presente trabajo se incluye al SO₂ pese a ser omitido por la EPA debido a la importancia de reducción. Como no existe tecnología de reducción de emisiones, entonces ε=0.

Los contaminantes criterios son aquellos con los que se establecen los niveles de calidad de aire y en los que se basan los documentos normativos. Uno de ellos es el SO₂ y debido a su importancia se incluye en el presente trabajo. Se tiene en cuenta entonces el factor de emisión propuesto por NPI (2001) para el SO₂. En las Tablas 1 y 2 se muestran los factores de emisión considerados en el estudio.

Tabla 1. Factores de emisión (EPA, 1993)

Sustancia	Factor de emisión (g/kg bagazo)
MP	7,8
NO _x	0,6

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

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

Debido a que las emisiones de SO₂ provenientes 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, Penedo y Salas (2015)
42,2	5,47	0,23	0,0	Oliva y Antolín, (2003)
42,54	5,17	0,63	0,3	Reyes, Perez, y Betancourt (2003)

47,0	6,5	-	0,0	Hassuani, Lima y Carvalho, (2005)
------	-----	---	-----	-----------------------------------

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. El estudio se realizó en la zafra 2016-2017. En ese periodo el central Ignacio Agramonte no molía caña y compraba bagazo excedente de otros centrales.

Tabla 4: Consumo de caña de los centrales.

Central/Municipio	# de chimeneas	# de calderas	Consumo de caña (t/h)
Argentina/ Florida	1	3	144
Batalla de Guásimas/ Vertiente	1	3	288
Carlos M. Céspedes/ Céspedes	1	3	271
Ignacio Agramonte/ Florida	1	1	-
Brasil/ Esmeralda	1	2	192
Siboney/ Sibanicu	1	1	77
Panamá/ Vertiente	1	4	288

Se restó posteriormente un 8%, cantidad almacenada en la casa de bagazo para un futuro arranque de la caldera (Tabla 5). En el caso del Ignacio Agramonte se empleó el valor de consumo máximo de bagazo de la caldera.

Tabla 5. Consumo de caña de las calderas

Central	Consumo de bagazo (t/h)	Temperatura salida gases de combustión (K)
Argentina	36	473
Batalla de Guásimas	71	466
Carlos M. Céspedes	67	633
Ignacio Agramonte	15	488
Brasil	48	506
Siboney	19	448
Panamá	71	523

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 considerando la masa de combustible gastado estimada anteriormente. Por otra parte, 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 (Nm³/s) para condiciones normales (0 °C y 760 mmHg),

V es el volumen de gases húmedos (Nm³/kg) para condiciones normales, y,

C es el consumo de combustible en kg/s.

Por otro lado, el volumen de gases V se calculó con los valores reportados por la EPA 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, n es el coeficiente de exceso de aire. En este caso n=1+exceso de aire.

Resultados y Discusión

En la Tabla 6 se muestran los resultados de las emisiones de los contaminantes atmosféricos producidas por las calderas estudiadas. Los valores de caudal y emisión estimados son varios órdenes superiores que los de los generadores de vapor convencionales localizados en distintas industrias e instituciones de la región que emplean hidrocarburos como combustible, utilizados en lavanderías, comedores y otros procesos industriales, debido fundamentalmente al volumen bajo de combustible consumido por estos. Las emisiones de los generadores de vapor de los centrales azucareros son además inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos (Fonte, Cuesta y Sosa, 2017). Esta conclusión coincide con Neto y Ramon (2002) quienes cuantificaron las toneladas de NO_x provenientes de la quema de emisiones fósiles dejadas de emitir. Los valores mayores se corresponden además con los más altos consumos de bagazo.

Tabla 6. Emisiones y flujos volumétricos.

Central	Emisiones (g/s)			Flujo de gases (m ³ /s)
	MP	NO _x	SO ₂	
Argentina	77,4	6,0	2,5	72,9
Batalla de Guásimas	154,7	11,9	5,0	145,8
Carlos M. Céspedes	145,8	11,2	4,7	183,8
Ignacio Agramonte	32,5	2,5	1,0	10,5
Brasil	103,2	7,9	3,3	69,3
Siboney	41,3	3,2	1,3	12,3

Panamá	154,7	11,9	5,0	214,9
--------	-------	------	-----	-------

Las Emisiones Máximas Admisibles (EMA) se han analizado en dependencia de las características de las instalaciones (NC/TS 803, 2010). Los generadores de vapor estudiados en este trabajo se clasifican como c-1 (Calderas de vapor. Biomasa). Esta norma solo concierne a los contaminantes SO₂, NO_x y material particulado.

Con el fin de comparar las emisiones con la norma anterior, se convirtieron los valores de concentración de los contaminantes a unidades de mg/Nm³. Se obtuvo como resultado que todas las chimeneas sobrepasan los límites normativos para el MP y los NO_x (Tabla 7). Naturalmente, el mayor aporte es del MP causado por el uso de bagazo como combustible. Por otra parte, ninguna de las emisiones de SO₂ supera la EMA establecida en la norma cubana debido al bajo contenido de azufre en el bagazo quemado. Deben ser validadas estas estimaciones determinando el valor real de las emisiones con analizadores de gases de combustión.

Tabla 7. Comparación normativa de las emisiones.

Central	Emisiones (mg/Nm ³)		
	MP	NO _x	SO ₂
EMA Fuentes existentes	400	100	1000
Argentina	1839,5	141,5	59,0
Batalla de Guásimas	1839,1	141,5	58,9
Carlos M. Céspedes	1839,3	141,5	59,0
Ignacio Agramonte	5518,6	424,5	176,9
Brasil	2758,3	212,2	88,4
Siboney	5516,6	424,4	176,8
Panamá	1379,7	106,1	44,2

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 et al, 2015).

Deben evaluarse opciones para la solución a la emisión de contaminantes. Neves (2005) concluyó que una disminución de un 20% de exceso de aire, conlleva a una reducción de un 30% en la

formación de NO_x y sugirió filtros convencionales para partículas como las mangas y los ciclones. Posteriormente, Torres et al (2015) presentaron la gasificación del bagazo como una opción limpia y altamente eficiente para la generación de electricidad. Por su parte, Ren y otros (2017) analizaron la torrefacción del bagazo con la resultante reducción de las emisiones de SO₂ y NO_x. Mientras, para las partículas Cassula et al (2015) sugirieron el tratamiento de las emisiones con un lavador de gases.

Conclusiones

Se evaluaron los contaminantes atmosféricos procedentes de los generadores de vapor de centrales azucareros camagüeyanos y se obtuvieron como resultado valores de emisión varios ordenes superior que los de los generadores de vapor convencionales que emplean hidrocarburos como combustible pero menores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos.

El contraste 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_x de todas las chimeneas se sobrepasan los valores fijados. Sin embargo, para el SO₂ ninguna de las emisiones supera el máximo legal.

Agradecimientos

A los especialistas, a Yolennis Echevarría del Argentina, a Luis González del Batalla de las Guásimas, a Yosbel Bartelemí del Carlos M. de Céspedes, a Lázaro Delgado del Agramonte, a Lázaro Mestre del Brasil, a Ramón del Siboney y a Hermes del Panamá; por el suministro de los datos y especificaciones con que se realizó este trabajo.

Referencias

- 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., et al. (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.
- Dirección general de salud ambiental [DIGESA] (2005). Inventario de emisiones de fuentes fijas cuenca atmosférica de la ciudad de Trujillo, Perú. Recuperado de <http://sial.segat.gob.pe/documentos/inventario-emisiones-fuentes-fijas-cuenca-atmosferica-ciudad-trujillo>
- Domenech, F., et al (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. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223122261005>.

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

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

Fonte, A., Cuesta, O., y Sosa, C. (2017). Estimación de emisiones contaminantes atmosféricas en la provincia de Camagüey desde fuentes fijas. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(1), 57-77.

Gadi, R., et al, D. C. (2003). Emissions of SO₂ and NO_x from biofuels in India. *Tellus B*, 55(3), 787-795. Recuperado de onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1034/j.1600-0889.2003.00065.x/pdf.

Gil Unday, 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. Universitat de Girona.

González, M. (2015). La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes. Bildner Center. Recuperado de <https://thecubaneconomy.com/articles/2015/12/la-agroindustria-canera-cubana-transformaciones-recientes/>.

Hassuani, S. J.; Lima, M. R. & Carvalho, I. (2005). Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash. PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento CTC - Centro de Tecnologia Canavieira.

Hernández, A., et al. (2015). Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones. *UCE Ciencia. Revista De Postgrado*, 3(2), 1-17.

Hernández, A., et al. (2016). Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros. *Ecosolar*, 56, 1-7. Recuperado de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/ecosolar/Ecosolar56/HTML/Articulo02N.htm>.

Hernández, A., Reinoso, M. y Hernández, F. (2017a). Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros avileños. *Universidad&Ciencia*, 6(2), 17-26. Recuperado de <http://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/408>.

Hernández, A., Reinoso, M. y Hernández, F. (2017b). Contaminantes atmosféricos emitidos por centrales azucareros cienfuegueros. *Universidad y Sociedad*, 9(2), 70-74. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223122261005>.

Hernández, A.; Reinoso, M. y Hernández, F. (2017c). Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros espirituanos. *Márgenes*, 4(4), 1-11.

Jiménez, R., et al. (2017). Potencialidades de entrega de energía eléctrica en dos centrales azucareros de la provincia de Cienfuegos. *Centro Azúcar*, 44(2), 60-68. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v44n2/caz07217.pdf>.

Kawashima, et al. (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. Recuperado de https://file.scirp.org/pdf/GEP_2015082415250200.pdf.

López. C. (2006). Introducción a la gestión de la calidad del aire. Modelación de la calidad del aire. Instituto de Meteorología.

- Manals, M.; Penedo, M. y Salas, D. (2015). Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal. *Tecnología Química*, 35(2), 244-255. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v35n2/rtq10215.pdf>.
- National Pollutant Inventory [NPI] (2001). Emission estimation technique manual for Combustion in boilers, Version 3.6.
- Neto, V. C. e 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.
- NC/TS 803 (2010). Calidad del aire — emisiones máximas admisibles. De contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor. Oficina Nacional de Normalización.
- Nova, 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.
- Oliva, D. y Antolín, G. (2003). Aproximación experimental a la combustión del bagazo de caña en lecho fluidizado. *Ecosolar*, 3. Recuperado de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar03/HTML/articulo03.htm>.
- Reinosa, M., et al (2017). Inventario de emisiones de dióxido de carbono procedentes de centrales azucareros de la provincia Mayabeque. *Ecosolar*, 57, 13-16.
- Ren, X., et al. (2017). Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass. *Fuel*, 188, 310-323.
- Reyes, J. L., Pérez, R. y Betancourt, J. (2003). Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental. *Ecosolar*, 5, 1-7. Recuperado de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/ecosolar05/HTML/articulo01.htm>.
- 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). Recuperado de <http://sujo.usindh.edu.pk/index.php/SURJ/article/view/2568/2104>.
- Torres, A., Almazán, O. y Hernández, B. (2015). Estudio de factibilidad económica de un proyecto de generación eléctrica, a partir de la gasificación de bagazo en un central azucarero cubano. *Revista Centro Azúcar*, 42(1), 1-8. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v42n1/caz01115.pdf>.