

# Tecnologías para reducir la contaminación atmosférica mediante purificación de gases de combustión, en un central azucarero

Yaima Izquierdo-González<sup>1\*</sup>, Adam Gonopolski<sup>2</sup>, José Alberto Pérez-Hernández<sup>1</sup>, Yohana de la Hoz-Izquierdo<sup>1</sup>

1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)

Vía Blanca, No. 804 y Carretera Central, San Miguel de Padrón. La Habana, Cuba

2. Universidad Estatal de Rusia de Petróleo y Gas (Gubkin). Moscú

\*[yaima.izquierdo2@gmail.com](mailto:yaima.izquierdo2@gmail.com)

## RESUMEN

**Introducción.** Los principales focos de contaminantes atmosféricos en los ingenios azucareros de Cuba son las emisiones gaseosas y las partículas sólidas que están presentes en los gases de combustión. El Estado cubano ha implementado nuevas legislaciones e inversiones con el objetivo de garantizar el sostenido desarrollo de la economía y proteger el medioambiente, con medidas correctoras y el empleo de nuevas tecnologías.

**Objetivo.** Proponer un equipamiento tecnológico para reducir la contaminación del medioambiente y preservar la calidad de vida de las personas.

**Materiales y Métodos.** Se realizó un estudio de los cuatro equipos de limpieza de partículas sólidas, se caracterizaron las emisiones de partículas y se desarrollaron nuevas tecnologías de limpieza de gases.

**Resultados y Discusión.** Se implementó, según las características del bagazo y su bajo costo de capital, los equipos de ciclón y el filtro de mangas, un filtro ciclónico para la extracción del sólido gaseoso y un filtro de manga para los finos. Con la implementación de los equipos de reducción de gases residuales y partículas sólidas se obtuvo una disminución de contaminantes atmosféricos de 7500 mg/m<sup>3</sup> a 1.125 mg/m<sup>3</sup>, valor inferior al que establece la norma cubana.

**Conclusiones.** Los nuevos aparatos, proporcionan un valor inferior al indicado por la norma cubana y su costo será amortizado con los impuestos que se dejaron de pagar por las emisiones de contaminantes. Se propone crear un centro de monitoreo para controlar las emisiones de las calderas y establecer las medidas correctivas pertinentes.

**Palabras clave:** limpieza de gases, emisiones contaminantes, equipamientos y tecnologías, medioambiente.

## ABSTRACT

**Introduction.** The main sources of atmospheric pollutants in Cuban sugar mills are gaseous emissions and solid particles present in combustion gases. Cuban state has adopted as a policy the implementation of new legislation, investments and increasing the measures, with the aim of ensuring the sustained development of the economy, protecting the environment, based on corrective measures and the use of new technologies.

**Objective.** To propose technological equipment for reducing environmental pollution, preserving people's quality of life.

**Materials and Methods.** A study was carried out on the four solid particle cleaning equipment, particle emission were characterized and new gas cleaning technologies were developed.

**Results and Discussion.** According to bagasse characteristics, an its low capital costs cyclone equipments and sleeve filter were arranged; cyclones to recover coarse solid particles from gaseous stream and

after that sleeve filter to separate fine particles.

With the implementation of the equipment to reduce residual gases and solid particles, a reduction in atmospheric pollutants was obtained from 7500 mg/m<sup>3</sup> to 1.125 mg/m<sup>3</sup>, which is lower than the Cuban standard.

**Conclusions.** New equipment reduces particle emissions into the atmosphere to less than the Cuban standard and will be paid for with the taxes not paid for pollutant emissions. It is proposed to create a monitoring center to control boiler emissions and establish the relevant corrective measures.

**Keywords:** gas cleaning, polluting emissions, equipment and technologies, environment.

## INTRODUCCIÓN

La protección del medioambiente se ha basado, tradicionalmente, en la adopción de medidas correctoras cuando el daño ya se ha producido. En la actualidad se está generalizando el concepto de prevención, a través de medidas que se anticipen, en lo posible, a la aparición del problema.

El aire que respiramos está formado por muchos componentes químicos, como: el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno (NOX) y partículas sólidas y líquidas, conocidas como material particulado. Muchos de estos contaminantes liberados a la atmósfera provienen de las industrias azucareras, principalmente de las calderas que queman combustibles fósiles y son responsables de un alto grado de contaminación ambiental (1).

Los principales focos de contaminantes atmosféricos en los ingenios azucareros de Cuba son las emisiones gaseosas y las partículas sólidas que están presentes en los gases de combustión, estos se producen por la incineración de la biomasa cañera (bagazo), que son expulsados a la atmósfera a través de la chimenea, de las instalaciones de combustión para generar energía eléctrica y calor industrial y por los procesos industriales (2).

El Estado cubano, como estrategia para minimizar la contaminación atmosférica, producida por los gases de combustión, ha implementado nuevas legislaciones y ha incrementado inversiones, medidas, exigencias y requisitos de normativas nacionales de emisiones de contaminantes (NC-TS 803: 2010), con el objetivo de garantizar el sostenido desarrollo de la economía, proteger el entorno y el medioambiente, basado en medidas correctoras y empleo de nuevas tecnologías (3).

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental proponer un equipamiento tecnológico para la limpieza del proceso de combustión de un central azucarero y, de esa manera, reducir la contaminación al medioambiente, preservar la calidad de vida de las personas y evitar que los niveles de contaminación atmosférica lleguen a límites perjudiciales para los seres humanos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En la actualidad, ninguna de las industrias productoras de azúcar y derivados tienen concebidas tecnologías de producciones limpias, amistosas con el medioambiente, hoy en día es política del país realizar inversiones para lograr incrementos productivos, pero tienen como prioridad la reducción de la carga contaminante tanto líquida como de emisiones gaseosas (4).

Los principales focos industriales de emisión de contaminantes a la atmósfera son las chimeneas de las instalaciones de combustión para la generación de energía eléctrica y calor industrial y de los procesos industriales propiamente dichos; estos procesos industriales sirven como fuente energética primordial para la generación de vapor, por la quema de este biocombustible en sus calderas y constituyen las principales fuentes de emisión de contaminantes gaseosos a la atmósfera. Los contaminantes se forman después de la quema de los residuos de biomasa de caña de azúcar (bagazo) en las calderas (5).

Para minimizar los impactos ambientales se realizó un estudio y la caracterización de las emisiones de particulados y se desarrollaron nuevas tecnologías de limpieza de gases que den respuesta a los requisitos, cada vez más rigurosos para reducir la emisión de contaminantes.

### Nuevas legislaciones y normas sobre emisiones en Cuba

Los principales focos de emisión de contaminantes gaseosos a la atmósfera son los producidos por la combustión de la biomasa cañera, bagazo generado en la caldera de los centrales azucareros. Como estrategia que sigue el país para avanzar en las líneas de producción más limpia, en los últimos años se han implementado nuevas legislaciones, se han incrementado las medidas, las exigencias y requisitos en las normativas nacionales de emisiones de contaminantes y se han realizado inversiones. Las normativas nacionales de emisiones de contaminantes; se aprecian en la tabla 1, en ella se muestran las nuevas legislaciones y normas sobre emisiones en Cuba (NC-TS 803: 2010) de Emisiones Máximas Admisibles

**Tabla 1.** NC-TS 803: 2010, Emisiones Máximas Admisibles (3)

Fuente	Lista de contaminantes	Indicadores existentes		Comentario
		Normas existentes (mg/Nm <sup>3</sup> )	Nueva norma NC-TS 803:2010 (mg/Nm <sup>3</sup> )	
Calderas de vapor para la quema de la biomasa	SO <sub>2</sub>	1000	500	El contenido de O <sub>2</sub> no más de 6 % en términos de gas seco
	NOx	100	100	
	Partículas sólidas	400	150	
	PM 10	300	100	

### Tecnologías de depuración de gases de combustión

Existen cuatro grandes grupos de sistemas de limpieza de partículas sólidas (6):

1. Separadores húmedos,
2. Precipitadores electrostáticos (de placas, tubulares, de dos etapas),
3. Separadores mecánicos (ciclones),
4. Filtros de gases (filtros de mangas).

#### Separadores húmedos

Los lavadores y absorbedores húmedos son equipos en los que se transfiere la materia suspendida en un gas portador a un líquido absorbedor en la fase mezcla gas-líquido, debido a la colisión entre las partículas de polvo y las gotas de líquido en suspensión en el gas.

##### Ventajas

- Permiten manejar gases inflamables con poco riesgo,
- Reducen la temperatura de gases calientes,
- Permiten remover gases y partículas al mismo tiempo,
- Permiten variar su eficiencia de colección con facilidad.

##### Desventajas

- Pueden presentar problemas de corrosión,
- Tanto el líquido de lavado como los sedimentos producidos pueden generar contaminación al desecharse,
- Un alto incremento en la humedad del gas hace visible la descarga en la chimenea,
- No se pueden recuperar las partículas tal como son generadas en la fuente.

### **Precipitadores electrostáticos**

#### Ventajas

- Tienen alta eficiencia de colección, incluso para partículas muy pequeñas,
- Pueden manejar grandes volúmenes de gas,
- Permiten la recuperación del material colectado, ya sea sólido o líquido,
- Pueden manejar gases a altas temperaturas.

#### Desventajas

- Alto costo de instalación,
- El espacio requerido es grande,
- Las variaciones en las condiciones de operación pueden afectar su desempeño,
- Poco adecuado cuando la resistividad de las partículas es demasiado alta o demasiado baja.

### **Separadores mecánicos (ciclones)**

Los ciclones son de los equipos más empleados dentro de las operaciones de separación de partículas sólidas de una corriente gaseosa, además de poder emplearse para separar sólidos de líquidos. Su éxito se debe, en parte, a que son equipos de una gran sencillez estructural, debido a que no poseen partes móviles y a que, apenas, exigen mantenimiento.

#### Ventajas

- Bajos costos de capital,
- Falta de partes móviles, por lo tanto, pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación,
- Caída de presión relativamente baja, comparada con la cantidad de partículas removidas,
- Las limitaciones de temperatura y presión dependen, únicamente, de los materiales de construcción,
- Colección y disposición en seco,
- Requisitos espaciales relativamente pequeños.

#### Desventajas

- Eficiencia en la recolección de partículas suspendidas totales relativamente bajas, en particular, para partículas menores de 10  $\mu\text{m}$ ,
- No pueden manejar materiales pegajosos o aglomerantes,
- Las unidades de alta eficiencia pueden tener altas caídas de presión, que incrementan el consumo energético en los ciclones.

### **Filtros de mangas**

Los filtros de mangas son considerados los equipos más representativos de la separación sólido-gas, mediante un medio poroso, pues son capaces de recoger altas cargas de partículas del proceso industrial. Su función consiste en recoger las partículas sólidas que arrastra una corriente gaseosa, esto se consigue al hacer pasar dicha corriente a través de un tejido. El tamaño de las partículas que separan los filtros de mangas es entre 2 y 30  $\mu\text{m}$ .

#### Ventajas

- Presentan altos rendimientos de depuración, incluso para partículas muy finas, los valores usuales de rendimiento son entre 99 y 99.9 %,
- Pueden operar con una amplia variedad de polvos de distinta naturaleza y propiedades tanto físicas como químicas,
- Permiten un diseño y construcción modular y son adaptables al tratamiento de caudales de gas muy distintos,
- La eficiencia de colección es muy alta,
- Permiten manejar fluidos de gas pequeños o muy grandes,

- Se pueden utilizar para filtrar diversos tipos de polvos,
- Consumo de energía moderado.

#### Desventajas

- Gran necesidad de espacio para su implantación,
- No pueden operar en ambientes húmedos o cerca del punto de rocío de la corriente gaseosa a tratar, pues existe el riesgo de colmatación de la tela, al quedarse el polvo húmedo adherido a ella tras la limpieza,
- No pueden depurar polvos adhesivos o aglomerantes por razones similares a la anterior.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó un estudio de los 4 equipos de limpieza de partículas sólidas y se determinó implementar, según las características del bagazo y su bajo costo de capital, los equipos de ciclón y el filtro de mangas, un filtro ciclónico para la extracción del sólido gaseoso y un filtro de manga para los finos. Con el establecimiento de estos equipos se puede incrementar la eficiencia de separación de las emisiones de contaminantes producidos en la combustión y, así, reducir el impacto ambiental.

### Cálculos del ciclón

Para el cálculo y diseño de un ciclón de alta eficiencia hay que tener en cuenta su diámetro, la caída de presión, la relación de velocidades, la eficiencia y la velocidad de entrada, que se deben regir por los parámetros del ciclón. En la tabla 2 se muestran los parámetros del ciclón, representado por la norma (7, 8).

**Tabla 2.** Parámetros de diseño del ciclón

Parámetros del ciclón		Parámetros calculados para el nuevo diseño del ciclón
Diámetro del ciclón Dc (m)	$\leq 1$	0.80
Caída de presión (Pa)	$\leq 2488.16$	1304.4
Relación de velocidades	$\leq 1.35$	1.09
Velocidad de entrada (m/s)	15.2 - 27.4	22
Eficiencia (%)	-	92

Como se observa en la tabla 2, el ciclón cumple con todos los parámetros de la norma; por lo tanto, el ciclón está apto para su operación.

### Cálculos del filtro de mangas

Para el cálculo y diseño de un filtro de mangas se debe tener en cuenta el número de mangas, la caída de presión, la velocidad del gas y la eficiencia, que deben regirse por los parámetros del filtro de mangas. La tabla 3 muestra los parámetros del filtro de mangas representados por la norma (9 -11).

**Tabla 3.** Parámetros de diseño del filtro de mangas

Parámetros del filtro de mangas		Resultados obtenidos
Eficiencia %	$\geq 99$	99.6
Caída de presión (Pa)	$\leq 2488.16$	2328.3
Velocidad del gas (m/s)	15.2 - 27.4	22

Como se observa en la tabla 3, el filtro de mangas cumple con todos los parámetros de la norma; por tanto, el filtro de mangas está apto para su operación.

Los sistemas de limpieza y purificación de partículas y gases se realizan en serie. Por esa razón se aplica, en la primera etapa, un sistema de limpieza con ciclón, con una eficiencia del 92 % y bajo costo de mantenimiento. Posteriormente, se aplica un filtro de mangas para alcanzar los niveles de emisiones requeridos por la NC-TS 803: 2010, con una eficiencia del 99.6 %. Si se pone una sola etapa para limpiar y purificar las partículas y gases, no cumple con los niveles de emisiones requeridos por la NC-TS 803: 2010 (3).

Por ejemplo, si se pone el ciclón, solamente se va a alcanzar una limpieza de partículas del 92 % y saldrá para la atmósfera un 8 %, esto no cumple con la NC-TS 803: 2010. Si se pone el filtro de mangas solo, este se tupe enseguida y se deteriora muy rápido y cambiarlo es muy costoso. Por esta razón se trabaja con dos sistemas de limpieza de partículas en serie, para alcanzar un 0.5 % de contaminantes de partículas y gases que salgan para la atmósfera. En la figura 1 se muestra como quedarían instalados los equipos de tratamiento de gases y partículas de polvos en un central azucarero.

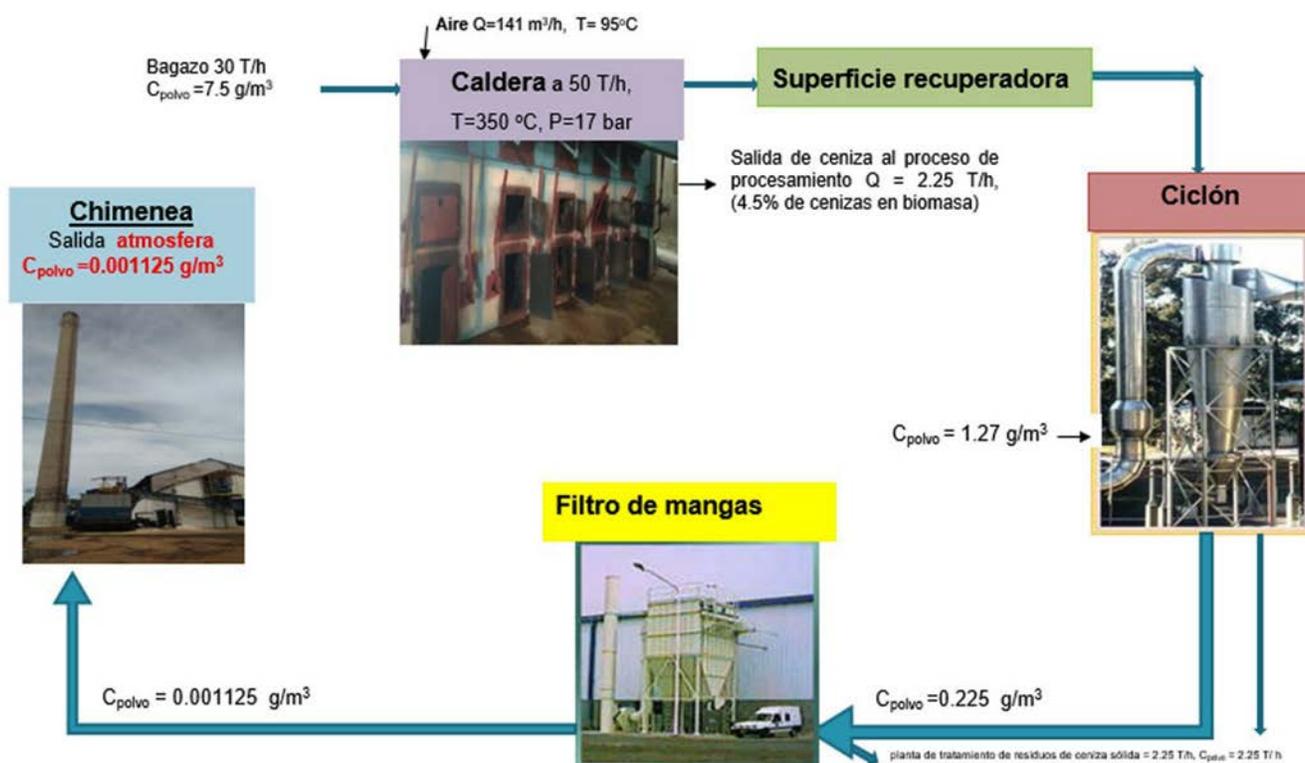


Figura 1. Esquema del sistema de limpieza de gases.

La descarga de los gases de escape de la caldera va a la succión del separador ciclónico y del filtro de mangas. El rechazo del separador ciclónico y del filtro de mangas se unen en el colector de cenizas de la caldera, que consiste en un foso que está por debajo del nivel cero de la caldera, en donde hay una piscina de agua en la que se descargan las cenizas de la caldera. Este sistema de extracción en humedad permite la reducción de la contaminación ambiental. El gas producido en el reactor se acondiciona para proteger a los otros equipos de la erosión y la corrosión. También se acondiciona para obtener la temperatura adecuada del gas de síntesis, para la etapa siguiente.

El esquema propuesto de limpieza de gases debe dar cumplimiento a las exigencias y a las normativas nacionales. La tabla 4 muestra los volúmenes de emisiones máximas admisibles en una caldera típica.

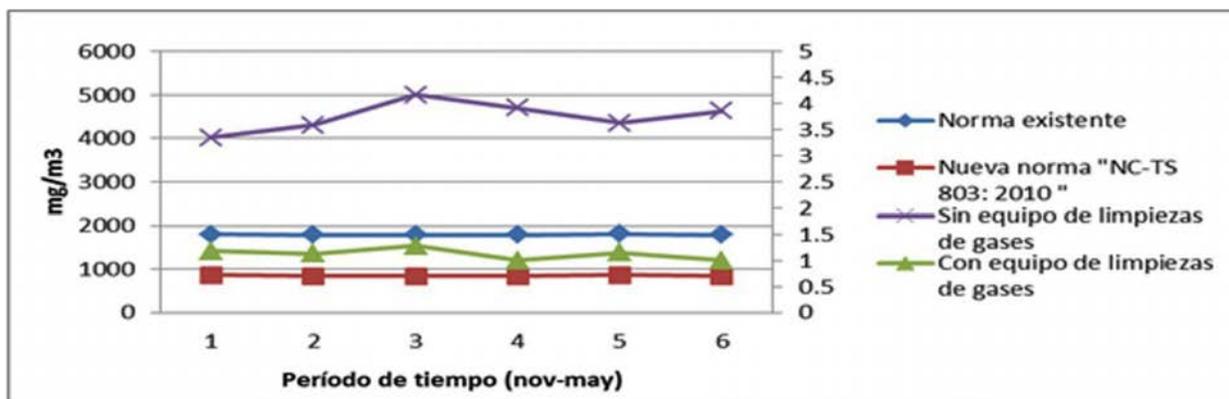
**Tabla 4.** Comparación anual de los volúmenes de las emisiones de gases de un central típico con caldera de 60 t/h y la implementación de la propuesta de este trabajo, con equipos de purificación y sin ellos

Parámetros de contaminación atmosférica	Valores anuales existentes de emisiones de ceniza para la caldera de 60 t/h en un central típico	Propuesta del proyecto de emisiones anuales de ceniza para la caldera 60 t/h en un central típico	Estándar (mg/m <sup>3</sup> )
	Sin equipo de purificación	Con equipo de purificación	
Cantidad de bagazo para la combustión (t/h)	22.75	22.75	100
Volumen de gases de combustión (m <sup>3</sup> /h)	195	195	100
% de emisión de partículas (mg/m <sup>3</sup> )	6500	6500	150
Cantidad total (g/m <sup>3</sup> )	7.5	7.5	150
Partículas gaseosas que entran en el ciclón (g/m <sup>3</sup> )	-	0.225	-
Partículas de gases que entran en el filtro de mangas (g/m <sup>3</sup> )	-	0.001125	-
Partículas de gases que salen de la chimenea a la atmósfera (mg/m <sup>3</sup> )	<b>7.5 g/m<sup>3</sup></b> <b>7500 mg/m<sup>3</sup></b>	<b>0.001125 g/m<sup>3</sup></b> <b>1.125 mg/m<sup>3</sup></b>	<b>150 mg/m<sup>3</sup></b>

Comité de Normalización Industrial. Estándares Cubanos 13: NC-TS 803: 2010.

En la tabla 4 se observa que hubo una disminución excepcional de partículas de gases que salen a la atmósfera, con la implementación de los dos equipos de purificación (ciclón y filtro de mangas), en concordancia con la norma.

En la figura 2 se muestra el estimado de la comparación del total de la densidad de masa de la contaminación de los gases de combustión en el período de trabajo de noviembre a mayo, en la actual versión (sin depuración de gases), con las actuales y las nuevas normas de Cuba, así como con los resultados esperados con la implementación de la propuesta principal de este trabajo.

**Figura 2.** Comparación de emisiones de los gases de combustión.

Esto significa que las nuevas instalaciones del filtro + mangas ciclón cumplen con los requisitos de los estándares cubanos para reducir la contaminación ambiental.

## Evaluación económica

Todo proceso inversionista requiere de un estudio de factibilidad técnico-económico, que justifique la inversión. Esta resulta una evaluación muy particular, pues la inversión no está asociada con un incremento de la producción ni de la calidad del producto azúcar que se produce, pero sí está asociada con la reducción de los costos de producción, pues todos los meses se paga una penalización por las emisiones al medioambiente, que sobrepasan los límites establecidos por las normas.

## Gastos anuales por no cumplimiento de las emisiones de contaminantes

La entidad productiva central paga anualmente un monto anual en el entorno de los 200 000 USD anual. Se considera para la evaluación económica el último pago de la factura anual perteneciente al 2017 que fue de 210 000 USD. En la tabla 5 se muestra el resumen de la evaluación económica de la inversión.

**Tabla 5.** Resumen de la evaluación económica de la inversión

Elementos	Valor
Ahorros anuales reportados por no emitir emisiones contaminantes y no pagar penalización	210 000 USD
Periodo de amortización de la inversión	10 años
Valor total de equipos, montaje, proyectos y puesta en marcha	879 500 USD
Gastos anuales durante la vida útil de la instalación	Operación = 50 000 USD Mantenimiento = 250 000USD Total = 300 000 USD
Depreciación 6 %	35 385 USD
Gastos generales en toda la vida útil del equipo	1 214 885 USD

Para determinar el tiempo de amortización se divide el gasto general, que es 1 214 885 USD por el valor ahorro, producido por no emitir contaminantes a la atmósfera, es decir:  $1\,214\,885 / 210\,000 = 6$  años. Esto significa que se reduce el pago de la inversión en un 60 % y, en 6 años, se debe alcanzar el pago de los gastos de inversión de un central típico, con nuevos equipos de purificación de gases y partículas.

## CONCLUSIONES

El uso de nuevos aparatos reduce las emisiones de partículas a la atmósfera a  $1.125 \text{ mg/m}^3$ , valor inferior al que establece la norma estándar, de  $150 \text{ mg/m}^3$ .

La planta de tratamiento de residuales de emisiones de partículas se va a amortizar con los impuestos dejados de pagar por las emisiones de contaminantes.

Se propone crear un centro de monitoreo para controlar las emisiones de las calderas y establecer las medidas correctivas pertinentes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. <https://www.quimica.es/enciclopedia/Aire.html>.
2. Gil, Z. Estudio del Impacto Ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en Cuba. Estudio de caso "Melanio Hernández", [Tesis Doctoral], Universidad de Girona, 2005, pp.230.

3. Comité de Normalización Industrial. Estándares Cubanos 13: NC-TS 803: 2010.
4. Cordovés, M., Sáenz, T., Cabello, A. Los derivados de la caña de azúcar // ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, Vol. 47, No.3, (2013), pp. 31–37.
5. Santamaría, A. La industria azucarera y la economía cubana a principios del siglo XX, vol. 42, no 2, (2014), pp. 71-114.
6. Prado, R., Icaza, J. Rediseño del sistema de depuración de gases de combustión del incinerador del centro de desarrollo tecnológico sustentable (CDTS) [Ingeniería mecánica], Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil-Ecuador, 2016, pp. 70.
7. Londoño, E. Diseño óptimo de ciclones// Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 5, No. 9, (2006), pp.123-139.
8. Тимонин, А.С. Инженерно-эологический справочник. Том 1, 2003. сс 462-492.
9. Тимонин, А.С. Инженерно-эологический справочник. Том 1, 2003. сс 499-542.
10. Тимонин, А.С. Инженерно-эологический справочник. Том 1, 2003. сс 515-541.
11. García, M., Silva, C. Eficiencia de un filtro de manga no tratamiento de gases oriundos de calderas de quema de biomasa sólida. Vol. 9, No. 11, (2013), pp. 293-308.