

Determinación de las emisiones de dióxido de azufre en la termoeléctrica “10 de octubre”

Determination of the emissions of dioxide of sulphur in the thermo electrical power plant “10 de octubre”

Fernando Prieto Montenegro¹, Isnel Benítez Cortes², Luis Beltrán Ramos Sánchez², Agustín García Rodríguez³

¹ Central Termoeléctrica “10 de octubre”, de Nuevitas”, Camagüey. Cuba.

² Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”, Camagüey. Cuba.

³ Universidad Central de Las Villas “Martha Abreu”, Santa Clara. Cuba.

E – mail: generacion@ctenue.une.cu

Recibido: 21 de septiembre de 2016.

Aceptado: 2 de noviembre de 2016.

Resumen

El objetivo de este trabajo es determinar las emisiones de gases de dióxido de azufre en la central termoeléctrica “10 de octubre”, de Nuevitas, Camagüey, Cuba al medio ambiente. Para ello, se aplica una metodología para la determinación de los volúmenes de gases a partir de la composición elemental del combustible. Se demuestra la relación que existe entre la potencia de generación de la unidad con el flujo de combustible. Con esta relación y con una serie de datos históricos, se precisa la estadística descriptiva de las diferentes variables que influyen en las emisiones, así como los niveles de emisiones para diferentes valores y potencia. Se comparan los valores de emisiones de dióxido de azufre con normas internacionales ello muestra niveles superiores al rango permisible, lo cual deteriora la calidad ambiental del aire.

Palabras clave: gases de combustión, termoeléctrica, emisiones, medio ambiente, dióxido de azufre.

Summary

This work is made out with the objective of determining the emissions of gases of the combustion to the environment in the "10 de Octubre" thermoelectric power station, of Nuevitas, Cuba. For this, the methodology for the determination of the volumes of gases from the elemental composition of the fuel is applied. The relationship between the generating power of the unit and the fuel flow is determined. With this relation and with a series of historical data, the descriptive statistics of the different variables influencing the emissions are determined, as well as the emission levels for different power values. The values of emissions of sulfur dioxide are compared with international standards showing that it is well above the norm, which brings with it serious environmental problems.

Keywords: combustion gases, electric power plant, emissions, environment, dioxide of sulphur.

Introducción

El uso del petróleo crudo cubano en las centrales termoeléctricas para la generación de energía, ha incrementado las emisiones de gases de la combustión. Medellín (2002) plantea que se estima que una unidad de 500 MW genera alrededor de 3 700 000 toneladas de dióxido de carbono, causante principal del calentamiento global, lo que equivale a cortar alrededor de 161 millones de árboles. A esto se suma unas 10 000 toneladas de dióxido de azufre, que causa la lluvia ácida, unas 500 toneladas de pequeñas partículas aéreas que causan diferentes enfermedades respiratorias y sobre 10 200 toneladas de óxidos de nitrógeno, causantes de la formación de smog, entre otras.

Aunque se han tomado un número importante de medidas para reducir estos impactos aún persisten carencias que limitan su mitigación, no obstante, se aprecia voluntad política para alcanzar el uso racional del petróleo crudo cubano. En este sentido acota Partido Comunista de Cuba (2011) en la política energética se debe elevar de forma significativa la eficiencia en la generación eléctrica, dedicando la atención y recursos necesarios al mantenimiento de las plantas en operación, mientras en la política de ciencia, tecnología, innovación y medio ambiente se aboga por la participación en la solución de los problemas tecnológicos de la producción y los servicios y la promoción de formas productivas ambientalmente sostenibles.

Si a esta situación se añaden los efectos causados por las sanciones económicas, financieras y comerciales impuestas por Estados Unidos de América a Cuba, que afectan el acceso a proveedores, fuentes de financiamientos e incrementan los gastos por concepto de transportación. Esta situación complejiza la estabilidad en la importación de combustible de calidad y exige el uso del crudo cubano para la generación de energía. Por ello se requiere el empleo de procedimientos para determinar la contaminación ambiental, sin embargo, según Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (2015) son insuficientes las capacidades para el monitoreo y evaluación sistemática de la contaminación, lo que incide de manera notable en el conocimiento acerca del alcance y las tendencias de esta problemática en el ámbito nacional.

Esta problemática adquiere mayor connotación cuando no se determinan las emisiones y radios de afectación provocada por el empleo del crudo nativo, por su alta viscosidad, alto contenido de cenizas, bajo poder calorífico y un alto contenido de azufre en comparación con los combustibles utilizados en el mundo. Este último aspecto, ha traído como consecuencia que se haya incrementado el nivel de SO₂ en los gases y provoca, en primer lugar, la corrosión de los sistemas de intercambio calórico en la zona de baja temperatura, fundamentalmente, en los calentadores de aire regenerativos (CAR), y se acorten los ciclos de mantenimiento al disminuir su vida útil, con el consecuente efecto económico. En segundo lugar, ha provocado el aumento de las emisiones de este gas a la atmósfera en cantidades por encima de las normas internacionales para su vertimiento, incrementando la contaminación atmosférica y causando un grave problema. En este orden López, Collazo y Hernández (2014) reconocen que esto ha provocado también un incremento de las lluvias ácidas en Cuba.

Seager y Stoker (1982) exponen que, entre los gases que se emiten a la atmósfera, el dióxido de azufre (SO₂), presenta un impacto significativo sobre las condiciones ambientales en general y la salud humana en particular.

En la provincia de Camagüey, se conoce que es precisamente el consumo de combustibles para la generación de electricidad el mayor contribuyente a estas emisiones con 70 894,37 ton/a, representando el 91,76 % del total, lo que equivale a emisiones per cápita del orden de 0,097 ton de SO₂ / habitantes en la provincia.

Aunque esta situación no sea alarmante, se ha de reconocer que las diferentes plantas y sistemas de generación de energía, que trabajan con el crudo nacional, se han convertido en emisores de este gas al no contar con plantas de tratamiento de los gases de combustión. Dentro de la provincia, se pueden mencionar los casos de la central termoeléctrica "10 de octubre", la fábrica de cemento "26 de Julio" y la empresa "Cerámica Roja".

En la central termoeléctrica "10 de octubre" se aprecia un contenido de azufre superior en comparación con otros petróleos. Esto provoca el incremento en las emisiones del dióxido de azufre en los gases de la combustión y cambios en la composición de otros gases, así como la incidencia de lluvias ácidas en la ciudad de Nuevitas. Por tanto, el propósito de esta investigación es determinar las emisiones de dióxido de azufre de la termoeléctrica "10 de octubre".

Materiales y métodos

Los métodos y técnicas utilizadas en la investigación correspondieron a los niveles teórico, empírico y matemático-estadísticos. Entre los primeros fueron empleados el analítico-sintético e inductivo-deductivo, necesarios para establecer los fundamentos teórico-metodológicos del trabajo, del nivel empírico se empleó la revisión documental, la propuesta se realiza con la utilización del procedimiento del nivel estadístico-matemático "Cálculo de eficiencia modificado" en Microsoft Excel para determinar la composición y volúmenes de gases de Tanquero, Aballe y Reyes (1985), este se emplea en la termoeléctrica "10 de Octubre".

Con el propósito de considerar la incertidumbre en este parámetro, caracteriza la distribución asociada con la variación de estos parámetros. Se utilizó para esto la información registrada por el sistema de captura en línea de datos instalado en la central termoeléctrica. Este sistema de adquisición de datos brinda la posibilidad de mediciones continuas en tiempo real, las cuales son promediadas cada una hora y éste es el valor que se registra en una hoja de cálculo de EXCEL, por lo que aparecen un total de 24 datos de cada parámetro tecnológico en un día. Se recogen un total de 5 088 mediciones de cada variable y se realiza un tamizado para eliminar las 3 944 mediciones donde se produjeron fallas en los sistemas de medición.

Al analizar los datos se encontraron valores de generación eléctrica muy pequeños que responden a momentos de arrancada y puesta en marcha de la unidad después de una parada programada u otra causa. Para llevar a cabo este segundo tamizado, se filtraron los datos de generación eléctrica por debajo de los 60 MW que representaron un 2,18 % de los valores totales (86 valores), y se realizó el estudio con los 3 858 valores restantes. Por último, se realiza la estadística descriptiva de estos datos. Para evaluar la dispersión de los datos, se determina el coeficiente de variación de estos.

La nomenclatura utilizada en el presente estudio se relaciona a continuación:

- Ar- Volumen teórico del argón, (Nm^3/kg)
- C- Contenido de carbono en el combustible, (%)
- CO_2 - Volumen teórico del dióxido de carbono, (Nm^3/kg)
- Gat- Humedad del aire teórico, (%)
- H- Contenido de hidrógeno en el combustible, (%)
- H_2O - Volumen teórico del vapor de agua, (Nm^3/kg)
- H_2O_c - Volumen de vapor de agua real, (Nm^3/kg)
- N_2 - Volumen teórico del nitrógeno, (Nm^3/kg)
- O- Contenido de oxígeno en el combustible, (%)
- O_{ps} - Volumen de gases secos reales, (Nm^3/kg)
- O_{psm} - Volumen teórico de gases secos, (Nm^3/kg)
- O_{pv} - Volumen total de gases de combustión, (Nm^3/kg)
- O_{pvm} - Volumen teórico de gases húmedos, (Nm^3/kg)
- O_{vzm} - Volumen teórico de aire para 1 kg de combustible, (Nm^3/kg)
- O_{vzs} - Volumen de aire seco en gases, (Nm^3/kg)
- P_b - Presión barométrica, (hPa)
- P_{sv} - Presión de vapor de agua en el aire en el límite de saturación, (hPa)
- r - Contenido del vapor de agua en el aire, (g/kg)
- S- Contenido de azufre en el combustible, (%)
- SO_2 - Volumen teórico del dióxido de azufre, (Nm^3/kg)
- α - Exceso de aire, (%)
- φ : Humedad relativa, (%)
- v: Coeficiente de humedad del aire, (adimensional)

Resultados y Discusión

El significativo contenido de azufre del petróleo crudo cubano producido en Varadero es una de las causas de la contaminación ambiental. Esto favorece trabajar con el valor promedio de 7,31 % de contenido de azufre en el combustible (tabla 1). Este estudio centra sus resultados en el dióxido de azufre, no obstante, es oportuno mostrar una metodología general para la determinación de los volúmenes de gases de la combustión, su composición y flujos individuales de todos los gases, los cuales están referidos a la masa de combustible. Sobre todo, porque el producto de estos volúmenes de gases con el flujo de combustible, serían los flujos máxicos o volumétricos de los gases de la combustión, extensible a otras investigaciones en este campo (figura 1).

La tabla 1 muestra el procedimiento para la determinación de los gases de combustión.

Propiedad	Pesado de Arabia	Bachenquero	Minas	Ladera del Norte	Romasquino	Varadero	Mazatlán	Tan Ching
	Arabia Saudita	Venezuela	Indonesia	E.U.A	Rusia	Cuba	México	China
Contenido de Azufre (%)	2,8	2,4	0,09	1,04	1,6	4-7,8	3,0	0,04

Tabla 2. Metodología para la determinación de los volúmenes de gases de combustión.

No	Paso correspondiente	Ecuación	
1	Cálculo del contenido del vapor de agua en el aire	$r = 622 \left[\frac{\frac{\varphi P_{sv}}{100}}{P_b - \frac{\varphi P_{sv}}{100}} \right]$	ec. 1
2	Cálculo del coeficiente de humedad del aire	$\nu = 1 + \frac{r}{622}$	ec. 2
3	Cálculo del volumen teórico de aire	$O_{vzm} = 8,899C + 26,531H + 3,333S - 3,34O$	ec. 3
4	Cálculo del volumen teórico de CO ₂	$CO_2 = 1,856C + 0,0003O_{vzm}$	ec. 4
5	Cálculo del volumen teórico de N ₂	$N_2 = 0,799N + 0,7809O_{vzm}$	ec. 5
6	Cálculo del volumen teórico de Ar	$Ar = 0,0093O_{vzm}$	ec. 6
7	Cálculo del volumen teórico de SO ₂	$SO_2 = 0,683S$	ec. 7
8	Cálculo del volumen teórico de H ₂ O	$H_2O = 11,1H + 1,24W$	ec. 8
9	Cálculo del volumen teórico de H ₂ O	$H_2O = 0,111H + 0,0124W + 1,24Gat$	ec. 9
10	Cálculo del volumen teórico de gases secos	$O_{sm} = CO_2 + N_2 + Ar + SO_2$	ec. 10
11	Cálculo del volumen teórico de gases húmedos	$O_{pvm} = O_{psm} + H_2O$	ec. 11
12	Cálculo del exceso de aire	$\alpha = 1 + \frac{\left[\frac{O_2}{(21 - O_2)} \right] O_{psm}}{O_{vzm}}$	ec. 12
13	Cálculo del volumen total de gases de combustión	$O_{pv} = O_{psm} + (\nu\alpha - 1)O_{vzm}$	ec. 13
14	Cálculo del volumen de gases secos reales	$O_{ps} = O_{psm} + (\alpha - 1)O_{vzm}$	ec. 14
15	Cálculo del volumen real de aire húmedo	$O_{vz} = \alpha\nu O_{vzm}$	ec. 15
16	Cálculo del volumen de vapor de agua real	$H_2Oc = H_2O + \alpha(\nu - 1)O_{vzm}$	ec. 16

Fuente: Tanquero, Aballe y Reyes (1985)

La potencia de generación de una unidad de la central termoeléctrica varía a medida que aumenta el tiempo de explotación. Esto se debe a que las superficies de transferencia de calor se van obstruyendo por las cenizas presentes en el combustible, aspecto este que se ha incrementado con el uso del crudo cubano. Esto provoca un incremento en la caída de presión de los gases lo que trae como consecuencia la limitación de la máquina, reduciendo la potencia. Esto se logra con la disminución del flujo de combustible, con su consecuente reducción de las emisiones de gases de combustión. Por tales motivos, se hace necesario estimar la relación entre el flujo de combustible y la potencia de

generación. Este trabajo se desarrolla en la unidad 6 con una potencia instalada de 125 MW.

La tabla 3 muestra los estadísticos descriptivos del flujo de combustible y la potencia. En cuanto a la dispersión de los datos, se aprecia que los coeficientes de variación en ambos casos son mayores del 10 %, lo que indica que no se puede trabajar con sus valores promedios y hay que tener en cuenta sus variaciones durante el periodo de explotación de estas unidades.

Tabla 3: Resultados de los estadísticos descriptivos del flujo de combustible y la potencia.

	Media	ET	Mediana	Moda	DE	Mínimo	Máximo	IC	CV
PE	91,1	0,25	92,2	80,6	15,4	60,1	125,0	0,4	16,9
FC	26,2	0,006	26,3	23,1	3,8	17,6	35,7	0,1	14,5

PE: potencia eléctrica (MW), FC: flujo de combustible (t/h), ET: error típico (%), DE: desviación estándar, IC: intervalo de confianza al 95 %, CV: coeficiente de variación (%).

Dependencia entre el flujo de combustible y la potencia eléctrica generada

La variabilidad de los datos del flujo de combustible está dada por la conocida y fuerte dependencia existente entre éste y la demanda de potencia eléctrica, dependencia que está dada por el balance de energía en todo el sistema. Para establecer esta relación, se verifica la relación empírica observada entre ambas variables en esta unidad. Esta relación empírica sencilla permite calcular el flujo de combustible que se necesita quemar para una entrega dada de potencia eléctrica. Los resultados se muestran en la figura 1.

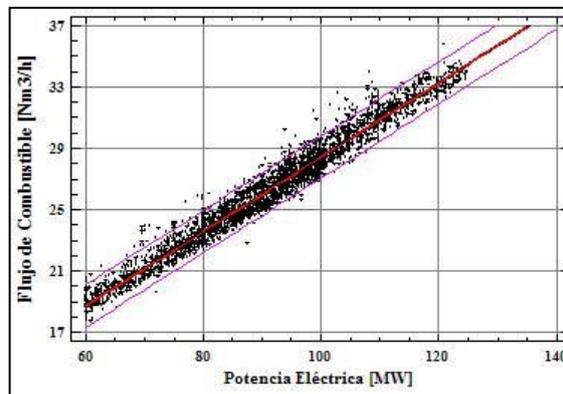


Figura 1: Dependencia entre el flujo de combustible y la potencia eléctrica demandada a la unidad #6 de la central termoeléctrica 10 de octubre.

La ecuación 17 muestra la relación que existe entre estas dos variables, donde F_c es el flujo de combustible quemado en la caldera en t/h y P_E la potencia eléctrica demandada a la unidad en MW.

$$F_c = 4.10457 + 0,24303P_E \quad \text{ec.}$$

17

El análisis estadístico de la regresión muestra un valor de $R^2 = 0,9662$, el estadígrafo calculado $f = 109\,954,1$ y una $p = 0,01$, lo que indica un ajuste suficientemente robusto.

Distribución estadística de la potencia eléctrica

La potencia eléctrica tiene un nivel de incertidumbre que no es posible representar con la media. Por ello, se pasa a caracterizar la distribución estadística que mejor la representa. La figura 2 muestra el ajuste a una distribución normal.

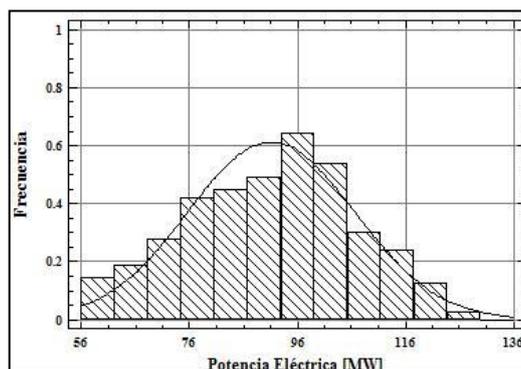


Figura 2: Distribución de frecuencias de la potencia de generación.

Los resultados indican falta de ajuste en esta distribución teórica y en todas las demás existentes en el programa STATGRAPHICS. Como se observa en un gráfico de probabilidad normal (figura 3), esta describe bien la data en un amplio rango que va aproximadamente desde 70-110 MW, pero, fuera de estos extremos, se aleja rápidamente. Por tales motivos, se escoge este rango para la estimación de los volúmenes de los gases de la combustión.

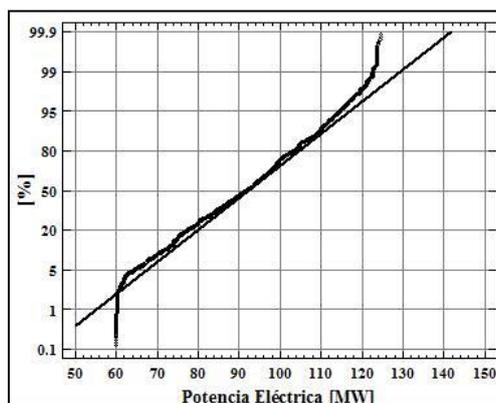


Figura 3: Gráfico de probabilidad normal para la potencia eléctrica.

Los resultados de la aplicación de la metodología se exponen en la tabla 4. En la misma aparecen los valores teóricos de los gases de la combustión, determinados a partir de la composición elemental del combustible. Estos resultados se muestran para una potencia de generación de 110 MW y están referidos a 1 kg de combustible. Con estos valores teóricos se determina, a partir de las diferentes variantes de potencia en estudio, la estadística descriptiva de cada uno, la cual aparece en la tabla 5.

Tabla 4: Resultados del cálculo de los volúmenes de gases de la combustión.

No	Parámetro	Valor	Unidades
----	-----------	-------	----------

1	Contenido del vapor de agua en el aire	15,590	g/kg
2	Coficiente de humedad del aire	1,025	%
3	Volumen teórico de aire	10,089	Nm ³ /kg
4	Volumen teórico de CO ₂	1,487	Nm ³ /kg
5	Volumen teórico de N ₂	7,882	Nm ³ /kg
6	Volumen teórico de Ar	0,094	Nm ³ /kg
7	Volumen teórico de SO ₂	0,049	Nm ³ /kg
8	Volumen teórico de H ₂ O	1,180	Nm ³ /kg
9	Volumen teórico de H ₂ O	1,490	Nm ³ /kg
10	Volumen teórico de gases secos	9,512	Nm ³ /kg
11	Volumen teórico de gases húmedos	11,002	Nm ³ /kg
12	Exceso de aire	1,8	%
13	Volumen total de gases de combustión	11,898	Nm ³ /kg
14	Volumen de gases secos reales	10,139	Nm ³ /kg
15	Volumen real de aire húmedo	10,985	Nm ³ /kg
16	Volumen de vapor de agua real	1,759	Nm ³ /kg
17	Volumen de aire seco en gases	0,628	Nm ³ /kg

Tabla 5: Flujos de gases de la combustión (Nm³/h).

Gases	Media (Nm ³ /kg)	Potencia de generación (MW)				
		70	80	90	100	110
CO ₂	1,487	25301,097	28914,953	32528,809	36142,666	39756,522
N ₂	7,876	133991,404	153132,447	172273,490	191414,533	210555,575
Ar	0,084	1433,121	1637,266	1841,411	2045,557	2249,702
SO ₂	0,051	854,710	976,225	1097,740	1219,255	1340,770
H ₂ O	1,484	25250,061	28856,626	32463,191	36069,757	39676,322
O ₂	0,913	17755,016	17755,016	19973,880	22192,744	24411,607
Fgases	11,894	204585,409	231272,533	260178,521	289084,509	317990,498

Estos resultados ya que permiten estimar las emisiones de los gases de la combustión bajo diferentes regímenes de trabajo en la termoeléctrica.

Determinación de la concentración de dióxido de azufre

Durante los días donde se realizaron los estudios, se tomaron mediciones aleatorias de estos gases con el analizador de gases TESTO 300, específicamente para determinar la concentración de dióxido de azufre y comparar con las normas internacionales de emisiones en puntos fijos, como es la chimenea de la central termoeléctrica. Estos resultados se muestran en la tabla 6. Esta comparación con las normas internacionales se debe a que Cuba no tiene establecidas estas normas de emisiones de SO₂ en fuentes fijas.

Tabla 6: Concentración de dióxido de azufre en los gases de combustión

Estadístico descriptivo	Valor	Unidad
Promedio	10224,63	mg/m ³
DE	1008,428	mg/m ³

CV	9,862741	%
----	----------	---

Si se comparan estos resultados con las normas internacionales (tabla 7) se aprecia un nivel superior, lo que indica la necesidad de implementar tecnologías para la reducción de las emisiones de este gas. Estos resultados indican la necesidad de establecer un sistema de monitoreo en zonas “aguas abajo” de las emisiones puntuales en la chimenea de la central termoeléctrica, que permitan estimar los posibles efectos medioambientales del consumo del petróleo crudo cubano.

Tabla 7: Normas internacionales de los niveles de emisiones del dióxido de azufre en algunos países del mundo.

País	Resolución	Tipo combustible	S máx, (%)	Límite máximo	Unidades
Argentina	182/95 de S. E.	Fuel y carbón	0,5	1700	mg/Nm ³
	881/99 de ENRE	Fuel y carbón	0,5	1700	mg/Nm ³
	108/01 de SE y M	Fuel y carbón	0,5	1700	mg/Nm ³
Colombia	Resolución número 909/2008	-	-	550 en instalaciones existentes	µg/m ³
España	Real Decreto 102/2011	-	-	25 límite diario	µg/m ³
México	NOM-022-SSA1-2010	-	-	288 µg/m ³ (0,110 ppm) en 24 horas	

De forma general, la presencia en incremento de estos gases de la combustión, además de traer consigo graves impactos ambientales, tienen asociado un impacto económico considerable, sea como petróleo crudo directamente o a partir de la utilización de mezclas como petróleo crudo nacional mejorado (Landa y Viscon, 2004). Según Babir (1990), se han identificado 36 tipos de daños ambientales para el caso de la combustión de portadores energéticos de tipo orgánico.

Conclusiones

La obtención del modelo que caracteriza el comportamiento de la potencia de generación en función del flujo de combustible brinda la posibilidad de estimar la carga de gases contaminantes para diferentes valores de potencia.

El análisis estadístico del comportamiento de la potencia permite establecer el rango entre 70-110 MW como el de mayor probabilidad de ocurrencia.

La determinación de las emisiones de gases en diferentes regímenes de trabajo, permiten a la central termoeléctrica predecir sus emisiones para diferentes niveles de potencia de generación.

Referencias

Barbir, T.N. (1990). Environmental Damage Due to Fossil Fuel Use, *International Journal of Hydrogen Energy*, 15 (10). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/221955437_Environmental_damage_due_to_fossil_fuels_use.

- López, R., Collazo, A. y Hernández, F. (2014). Acidificación de las precipitaciones en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 20 (2). Recuperado de <http://www.met.inf.cu/contenidos/biblioteca/revistas/2014/n2/9.pdf>
- Landa, J. y Vizcón, R. (2004). Estimadores cuantitativos de la emisión de contaminantes atmosféricos por combustión del petróleo crudo cubano y su efecto económico. *Revista energética*, XXV (2). Recuperado de <http://www.rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/download/167/166>
- Medellin, P. (2002). Impacto ambiental de una termoeléctrica. *Pulso, Diario de San Luis*, Sección Ideas, 4.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (2015). Estrategia Ambiental Nacional 2016 – 2020. Cuba: Autor.
- Partido Comunista de Cuba (2011). *Lineamientos de la política económica y social del partido y la Revolución*. Cuba: Autor.
- Stoeker, H. y Seagen, L. (Eds). (1982). *Química Ambiental: contaminación del aire y del agua*. Barcelona: Editorial Blume.
- Tanquero, N., Aballe, L.M. y Reyes, D. (Eds). (1985). *Guía metodológica para proyectos de curso de generadores de vapor*. La Habana: Editorial MES.