



Dyna

ISSN: 0012-7353

[dyna@unalmed.edu.co](mailto:dyna@unalmed.edu.co)

Universidad Nacional de Colombia

Colombia

Mustafa-Moraes, Nadime; Holanda-Bezerra, Ubiratan; Moya-Rodríguez, Jorge Laureano;  
Cabral-Leite, Jandecy

El índice de emisiones como parámetro para evaluar la contaminación ambiental de las  
Centrales Térmicas. Estudio de caso

Dyna, vol. 83, núm. 199, 2016, pp. 218-224

Universidad Nacional de Colombia

Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49648868028>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# The emission index as a parameter for assessing the environmental pollution from thermal power plants. Case study

Nadime Mustafa-Moraes <sup>a</sup>, Ubiratan Holanda-Bezerra <sup>b</sup>, Jorge Laureano Moya-Rodríguez <sup>c</sup>, Jandecy Cabral-Leite <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Universidade do Estado do Amazonas (UEA). Manaus - Amazonas - Brazil. [mustafanadime@gmail.com](mailto:mustafanadime@gmail.com)

<sup>b</sup> Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (ITEC/CEAMAZON/UFPa). Brazil. [bira@ufpa.br](mailto:bira@ufpa.br)

<sup>c</sup> Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (ITEGAM). Manaus - Amazonas - Brazil. [jorgemoyar@gmail.com](mailto:jorgemoyar@gmail.com),  
[jandecy.cabral@itegam.org.br](mailto:jandecy.cabral@itegam.org.br)

Received: June 18<sup>th</sup>, 2015. Received in revised form: February 20<sup>th</sup>, 2016. Accepted: July 21<sup>th</sup>, 2016.

## Abstract

In power plants, in addition to electricity, a lot of air pollution by exhaust gases are generated. There are many national and international standards that establish the permissible limits of different substances, but still has not been developed a mathematical expression to evaluate the environmental impact caused by all components of the exhaust gases as a whole. A method to evaluate this impact is developed in this paper. The developed mathematical expression was called "emission rate". Emission rates for gas engines and fuel oil engines are offered. To get a better idea of the environmental impact of each type of engine was also developed the "specific emission index", which is the emission rate divided by the power delivered by the engine. Comparisons between specific emission rates of different engines are offered by means of a case study in a power plant in the city of Manaus.

**Keywords:** Pollution, electricity generation, environment.

## El índice de emisiones como parámetro para evaluar la contaminación ambiental de las Centrales Térmicas. Estudio de caso

### Resumen

En las plantas generadoras de electricidad, además de la energía eléctrica, se generan contaminantes del aire por los gases de escape. Hay normas nacionales e internacionales que establecen los límites permisibles de diferentes sustancias, pero no existe una expresión matemática para evaluar el impacto ambiental producido por todos los componentes de los gases como un todo. En este trabajo se desarrolla un procedimiento para evaluar este impacto. A la expresión matemática desarrollada se le denominó "índice de emisiones". Se ofrecen los índices de emisiones para motores de gas y de Fueloil. Para tener una idea exacta del impacto ambiental de cada tipo de motor se desarrolló también el "índice de emisiones específicas", que es la tasa de emisión dividida por la potencia del motor. Se ofrecen comparaciones entre los índices de emisión específicos de los motores a través de un estudio de caso de una planta generadora de electricidad en la ciudad de Manaus.

**Palabras Clave:** Contaminación, centrales térmicas, medio ambiente.

### 1. Introducción

La degradación ambiental, cada vez más acelerada a nivel mundial y los impactos adversos de la generación de energía ha recaudado cada vez más la atención de políticos e investigadores en las últimas décadas. Uno de los principales contribuyentes a la emisión de gases de efecto invernadero

hacia la atmósfera, que a su vez son los responsables del cambio climático, es el uso de combustibles fósiles en las plantas generadoras de electricidad y en los vehículos automotores [1,2].

Una norma de calidad del aire establece legalmente un límite superior para la concentración de determinado componente atmosférico para garantizar la protección de la

**How to cite:** Mustafa Moraes, N., Holanda Bezerra, U., Moya Rodríguez, J. L. & Cabral Leite, J. El índice de emisiones como parámetro para evaluar la contaminación ambiental de las Centrales Térmicas. Estudio de caso DYNA 83 (199) pp. 218-224, 2016

salud y el bienestar de las personas. Las Normas establecidas se basan en estudios científicos sobre los efectos de los contaminantes específicos sobre la salud y se establecen niveles que puedan propiciar un margen de seguridad adecuado [3,4].

El nivel de polución del aire se mide por la cuantificación de las sustancias poluentes presentes en el mismo. Se considera poluente cualquier sustancia presente en el aire y que por su concentración pueda tornarlo impropio, nocivo u ofensivo a la salud, inconveniente al bienestar público, dañino a los materiales, a la fauna y a la flora o prejudicial a la seguridad y al disfrute de la propiedad y a las actividades normales de la comunidad. Sin embargo, se ha demostrado que una forma efectiva de reducir las emisiones contaminantes es el uso de estrategias operacionales adecuadas para centrales térmicas [5], las cuales se pueden implementar a través de programación de modelos matemáticos, minimizando las emisiones como una función objetivo o considerando límites de emisiones como restricciones. El despacho de carga de una planta generadora de electricidad puede ser formulado como un problema de optimización de un solo objetivo convirtiendo las emisiones en restricciones [6].

La determinación sistemática de la calidad del aire debe ser, por problemas de orden práctico, limitada a un restringido número de poluentes, definidos en función de su importancia y de los recursos materiales y humanos disponibles. De forma general, la selección recae siempre sobre un grupo de poluentes que sirven como indicadores de calidad del aire, establecidos universalmente, entre ellos: dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), partículas en suspensión, monóxido de carbono (CO), ozono (O<sub>3</sub>) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). La razón de escoger estos parámetros como indicadores de la calidad del aire está ligada a su mayor frecuencia de ocurrencia y a los efectos adversos que causan al medio ambiente. Para el problema del cambio climático causado por los gases de efecto invernadero, la Unión Europea (UE) introdujo el "Emission Trading Scheme" (ETS), que adopta el mecanismo de mercado "cap-and trade" para el comercio de emisiones de CO<sub>2</sub> [7]. En este régimen, las licencias o permisos de emisión son primero colocados para cada instalación industrial; las instituciones participantes pueden comprar licencias adicionales y/o vender su exceso de emisión al mercado. Por otro lado, algunos países como Finlandia introdujeron el tributo ecológico (Impuesto sobre el carbono), incluyendo el impuesto con base tanto a la cantidad de carbono contenido en el combustible como a la cantidad de emisión de CO<sub>2</sub> [8]. La tasa del impuesto se decide principalmente por la regulación de las autoridades con el doble objetivo de reducir la emisión de CO<sub>2</sub> y la promoción del desarrollo técnico.

Con la introducción de los impuestos del mercado ecológico y de emisiones para el sector de la energía eléctrica, el desarrollo de métodos de toma de decisión en materia de comercio de emisiones, o restricción de las mismas, se está tornando cada vez más importante, y muchos estudios para decidir la programación de los generadores de electricidad se están llevando a cabo [9-11].

Para obtener una solución óptima, compatible tanto o con la economía, como también con el medio ambiente es

importante considerar no solo el nivel de eficiencia de cada unidad de generación, sino también la contaminación que provoca. Sin embargo, la mayoría de los estudios de despacho de carga que incluyen restricciones ambientales, se concentran sobre la solución que maximiza el lucro por unidad de generación, más no las soluciones óptimas de Pareto en la reducción de estas emisiones.

Por eso es importante conocer el menor nivel posible de emisiones de contaminantes tales como el CO<sub>2</sub>, el NO<sub>2</sub>, el SO<sub>2</sub>, etc. de acuerdo a las afectaciones que pueden provocar en la salud humana, basado en las instalaciones de generación existentes. Las soluciones óptimas de Pareto de optimización multiobjetivo del despacho económico y de las emisiones se pueden obtener teniendo en cuenta los precios del combustible y las afectaciones de los gases de escape, para la toma de decisiones económicas y ambientales.

En el presente trabajo se desarrolla un procedimiento para evaluar el impacto ambiental producido por todos los componentes de los gases de escape en una planta generadora de electricidad, a la expresión matemática desarrollada se le denominó "índice de emisiones". El procedimiento fue aplicado a una planta generadora de electricidad de la ciudad de Manaus.

## 2. Formas de evaluar las emisiones en las plantas de generación de electricidad.

Discusiones exhaustivas de las fuentes, los efectos, y la necesidad de reducir la contaminación atmosférica debido a la generación de energía eléctrica se ofrecen en muchos trabajos de la literatura [12-14]. Por otra parte, la última de estas referencias presenta una descripción detallada de la valoración de las externalidades ambientales, mientras que [15] analiza cuatro métodos básicos de valoración. En [16,17] se tratan los efectos de las externalidades ambientales en las decisiones económicas tomadas en la planificación y las operaciones del sistema de generación de electricidad.

Las emisiones pueden reducirse a través de los siguientes medios:

- Sistemas de limpieza post-combustión, tales como precipitadores electrostáticos (las emisiones de SO<sub>x</sub> pueden reducirse mediante la instalación de lavadores de gases). Esto requiere no sólo un tiempo considerable para el diseño, pruebas e instalación, sino también considerable desembolso de capital.
- El cambio a combustibles con bajo potencial de emisiones (las emisiones de SO<sub>x</sub> pueden reducirse cambiando permanentemente a un combustible bajo en azufre). El cambio de combustible depende del precio y la disponibilidad de combustible bajo en azufre, tales como el petróleo, gas y carbón de bajo contenido de azufre.
- Realizar un despacho de carga que además minimice las emisiones en lugar de que sea un complemento al objetivo "costo" del despacho de carga tradicional.

La mayor parte del trabajo de investigación realizado hasta el momento se concentra en la reducción de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). El mayor esfuerzo se ha dedicado a la reducción de un tipo de contaminantes o de una mezcla de contaminantes. La tendencia ha sido reducir la producción total de las emisiones

o reducir la concentración de la contaminación a nivel del suelo en ciertas áreas que a su vez, depende de las emisiones y de las condiciones meteorológicas.

La importancia dada actualmente al despacho de carga económico – ambiental se debe en parte a los recientes compromisos de los gobiernos norteamericanos y europeos para mejorar la calidad del aire y otros problemas ambientales [18,19].

### 2.1. Modelos para evaluar las mediciones.

Entre los temas centrales relacionados con el despacho de carga económico ambiental están los que tienen que ver con modelar con precisión la relación entre la cantidad de cada poluyente y la potencia generada por cada motor, buscando los niveles de concentración de emisiones resultantes en los sitios seleccionados, y las técnicas empleadas para asignar los costos externos a la contaminación.

Hay tres posibilidades para tener en cuenta las emisiones en el despacho de carga:

1. Considerarlas como restricciones dentro del despacho económico [5,20-22]
2. Incluir las con un determinado factor de peso dentro del despacho económico [23-25]
3. Considerarlas como una función objetivo independiente, pero asignarle valores de costo en dinero.

La mayoría de los modelos existentes le asignan un valor en dinero a las emisiones para tenerlas en cuenta como una función objetivo de costo. Algunos autores solo consideran los efectos del SO<sub>2</sub>, otros del NO<sub>2</sub> y otros del CO<sub>2</sub> pocos autores consideran todos los efectos en conjunto y cuando lo hacen siempre como se dijo anteriormente es en función de costos. Sin embargo, cuando se trata de contaminación ambiental entran en juego aspectos relacionados con la salud humana que son más importantes que los costos.

### 3. Contaminantes del medio ambiente considerados en Brasil

Según la CONAMA [3], se consideran poluentes estandarizados en Brasil los siguientes:

- partículas totales en suspensión
- humo
- dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>);
- partículas inhalables;
- monóxido de carbono (CO);
- ozono (O<sub>3</sub>);
- dióxido de nitrógeno.

Los estándares nacionales de la calidad del aire establecidos en la Resolución CONAMA n.3 de 28/06/90 se muestran en la Tabla 1 [3].

### 4. El índice de emisiones como nuevo parámetro para evaluar la contaminación ambiental producida por los motores de una planta generadora de electricidad

En la mayoría de las plantas productoras de electricidad con motores de combustión interna se usa como combustible el gas natural o el petróleo, siendo diferente el grado de contaminación que producen en dependencia del combustible usado.

Tabla 1.  
Normas de calidad del aire en Brasil.

Poluyente	Tiempo de Muestra	Patrón Primario $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4)	Patrón Secundario $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4)	Método de medición
Partículas Totales en Suspensión	24 horas (1) MGA (2)	240 80	150 60	Mostrador de grandes volúmenes
Dióxido de Azufre	24 horas (1) MAA (3)	365 80	100 40	Pararosanilina
Monóxido de Carbono	1 hora (1) 8 horas (1)	40.000 (35pmm) 10.000 (9 pmm)	40.000(35 pmm) 10.000 (9 pmm)	Infrarrojo no dispersivo
Ozono	1 hora (1)	160	160	QUIMIOLU MINISCENCIA
Humo	24 horas (1) MAA (3)	150 60	100 40	Reflectancia
Partículas Inhalables	24 horas (1) MAA (3)	150 50	150 50	Separación Inercial Filtración
Dióxido de Nitrógeno	1 hora (1) MAA (3)	320 100	190 100	Quimioluminiscencia

(1) No debe ser excedido más que una vez al año.

(2) Média geométrica anual (MGA).

(3) Média aritmética anual (MAA).

(4) La condición de referencia para las concentraciones es de 25°C y la presión de 760mmHg.

Fuente: [3].

Tabla 2.  
Datos para determinar el índice de emisiones de los motores a gas

Poluyente	Patrón primario de la CONAMA $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Peso específico Permisible	Valor de influencia
Partículas totales en suspensión	240	0,00592885	0,99407115
Monóxido de Carbono	40000	0,98814229	0,01185771
Dióxido de Nitrógeno	320	0,00790514	0,99209486
Hidrocarbonatos	160	0,00395257	0,99604743
Total	40480	1	3

Fuente:[3, 4].

### 4.1. Índice de emisiones de los motores movidos con gas natural.

Para evaluar la polución del medio ambiente provocada por los motores a gas se desarrolló el índice de emisiones de los motores a gas. Para desarrollar la expresión matemática del índice de emisiones se tuvieron en cuenta los límites establecidos de calidad del aire por la CONAMA y se determinó el valor ponderado de cada poluyente dentro de la calidad del aire. Para ello se halló cuanto era el peso específico de cada poluyente de acuerdo a los valores máximos del poluyente en cuestión admitido por la norma, conforme se muestran en la Tabla 2.

Mientras menor sea la cantidad de un poluyente permitido por la CONAMA, mayor será su influencia nociva en el índice de emisiones y por tanto se le asignará un mayor valor de influencia. Se consideró además como valor de influencia de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la unidad (1). La expresión para calcular la tasa de emisiones de los motores de gas queda entonces de la siguiente manera:

$$I_{emg} = CO_2 + 0,994MP + 0,0118CO + 0,992NO_2 + 0,996 C_xH_y \quad (1)$$

Como los motores de gas también emiten monóxido de nitrógeno, se decidió incluirlo en la expresión con la misma cantidad de influencia que el NO<sub>2</sub>, quedando la expresión como:

$$I_{emg} = CO_2 + 0,994MP + 0,0118CO + 0,992(NO_2 + NO) + 0,996 C_xH_y \quad (2)$$

Para el cálculo de la tasa de emisión o índice de emisiones, los valores de emisión deben estar en el mismo sistema de unidades, siendo necesario llevar a cabo las conversiones de la misma de acuerdo con las empresas que realizan el control de estas emisiones.

La Tabla 3 muestra los valores de emisión en las diferentes unidades que más se usan y los factores de conversión para que todos queden en mg /Nm<sup>3</sup>.

Para realizar las conversiones fueron tenidos en cuenta los pesos molares de los componentes conforme a los valores y procedimientos siguientes (Tabla 4):

$$mg/m^3 = \frac{ppm \times PM}{24,45} \quad (3)$$

Tabla 3.  
Factores de conversión

Parámetro	Unidades iniciales	Multiplicar por	Unidades finales
Partículas (MP)	mg/Nm <sup>3</sup>	1	mg /Nm <sup>3</sup>
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	mg /Nm <sup>3</sup>	1	mg /Nm <sup>3</sup>
Monóxido de Nitrógeno (NO)	mg /Nm <sup>3</sup>	1	mg /Nm <sup>3</sup>
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	%	18000	mg /Nm <sup>3</sup>
Monóxido de Carbono (CO)	ppm	1,25	mg /Nm <sup>3</sup>
Hidrocarburos (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> )	%	17960	mg /Nm <sup>3</sup>

Fuente: Los autores.

Tabla 4.  
Pesos molares.

Sustancia	Peso molar
C	12g/mol
O <sub>2</sub>	32 g/mol
O	16 g/mol
CO <sub>2</sub>	44 g/mol
CO	28g/mol
N	14g/mol
N <sub>2</sub>	28g/mol
H	1g/mol
Metano CH <sub>4</sub>	16g/mol
Hexano C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86g/mol

Fuente: Los autores.

Tabla 5.  
Emisiones Típicas de los motores a gas

Emisiones típicas de un Motor a gas (UGGN 12)	Valores originales	Valores a 3%mg/m <sup>3</sup>
Partículas mg/Nm <sup>3</sup>	76,57	76,57
Dióxido de Nitrógeno mg/Nm <sup>3</sup>	315,07	315,07
Oxígeno % a mg/Nm <sup>3</sup>	12,3	80490,7975
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) % a mg/Nm <sup>3</sup>	4,8	86400
Monóxido de Carbono CO ppm a mg/Nm <sup>3</sup>	286	327,525562
Monóxido de Nitrógeno mg/Nm <sup>3</sup>	105	105
Hidrocarburos (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> ) de ppm a mg/m <sup>3</sup>	861,64	1688,8144
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> como NO <sub>2</sub> ) ppm a (mg/Nm <sup>3</sup> )	213	400,44

Fuente: Los autores.

Después de usar todos los factores de conversión, la expresión para calcular la tasa de emisión de los motores de gas es la siguiente:

$$I_{emg} = 18000 CO_2 + 0,994MP + 0,0118 * 1,25CO + 0,992(NO_2 + NO) + 0,996 * 17960 C_xH_y \text{ en mg/Nm}^3 \quad (4)$$

En la expresión anterior el CO<sub>2</sub> y los C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> están expresados en %, el CO en ppm y los demás datos en mg /m<sup>3</sup>.

En la Tabla 5 se ofrecen las emisiones típicas de un motor a gas de una planta generadora de electricidad en las unidades originales en que fueron medidas y después de convertidas.

#### 4.2. Índice de emisiones de los motores movidos con fueloil.

En este caso el procedimiento desarrollado fue el mismo que para los motores a gas, solo teniendo en cuenta las emisiones de este tipo de motores. En las Tablas 6 y 7 se muestran los correspondientes datos y los factores de conversión.

Para el caso de los motores que usan fueloil, el índice de emisiones se calcula como:

$$I_{emHFO} = 1800 \times CO_2 + 0,9941MP + 1,25 \times 0,0265CO + 0,992(NO_2 + NO) + 0,991 SO_2 + 0,9961 * 17960 C_xH_y \text{ em g/Nm}^3 \quad (5)$$

En la Tabla 8 se ofrecen las emisiones típicas de un motor de fueloil, en este caso de la firma MAN.

Tabla 6.  
Datos para determinar el índice de emisión de los motores movidos con fueloil

Poluente	Patrón primario de la CONAMA $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Peso específico permisible	Valor de influencia
Partículas totales en suspensión	240	0,0059	0,9941
Monóxido de Carbono	40000	0,9735	0,0265
Dióxido de Nitrógeno	320	0,0078	0,9922
Dióxido de Azufre	365	0,0089	0,9911
Hidrocarburos	160	0,0039	0,9961
TOTAL	41085	1	4

Fuente: Los autores.

Tabla 7.

Factores de conversión en el caso de los motores de fueloil

Parámetro	Unidades iniciales	Multiplicar por	Unidades finales
Partículas (MP)	mg/Nm <sup>3</sup>	1	mg /Nm <sup>3</sup>
Dióxido de	mg /Nm <sup>3</sup>	1	mg /Nm <sup>3</sup>
Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )			
Monóxido de	mg /Nm <sup>3</sup>	1	mg /Nm <sup>3</sup>
Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )			
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	%	18000	mg /Nm <sup>3</sup>
Monóxido de	ppm	1,25	mg /Nm <sup>3</sup>
Carbono (CO)			
Dióxido de Azufre	mg/Nm <sup>3</sup>	1	mg /Nm <sup>3</sup>
Hidrocarburos (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> )	%	17960	mg /Nm <sup>3</sup>

Fuente: Los autores.

Tabla 8.

Emisiones típicas de un motor MAN a fueloil

Emissões Típicas dum Motor MAN (MAN 1)	U originales	a 7% mg/m <sup>3</sup>	a 3% mg/m <sup>3</sup>
Material Particulado mg/m <sup>3</sup>	156,65	156,6	201,407
Dióxido de Enxofre mg/m <sup>3</sup>	287,42	287,4	369,54
Oxigênio % a mg/m <sup>3</sup>	13,7	179304	230534
Dióxido de Nitrogênio mg/m <sup>3</sup>	315,07	315,0	405,09
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) % a mg/m <sup>3</sup>	5,5	98977	127256
Monóxido de carbono CO ppm a mg/m <sup>3</sup>	66,66	76,33	98,1496
Monóxido de Nitrogênio mg/m <sup>3</sup>	1167	1167	1500,42
Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> como NO <sub>2</sub> ) (mg/m <sub>3</sub> )	1843	1843	2369,5
Hidrocarbonetos Totais (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> ) de % a (mg/m <sub>3</sub> )	0,03	588	756

Fuente: Los autores.

## 5. Índice específico de Emisiones

Para evaluar mejor el índice de emisiones es importante tener en cuenta que potencia está generando el motor cuando está teniendo determinadas emisiones; ello permite establecer comparaciones justas entre motores de diferente potencia y usando diferentes combustibles. Para ello se creó el concepto de índice específico de emisiones, que no es más que dividir el índice de emisiones por la potencia suministrada por el motor.

$$I_{espem} = \frac{I_{em}}{P} \quad (7)$$

Dónde:

 $I_{em}$  - Índice de emisiones $P$  - Potencia del motor

## 6. Índice de emisiones de una planta generadora de electricidad. Estudio de caso

La planta térmica estudiada se encuentra situada en la ciudad de Manaos y tiene una capacidad de generación de 175 mW. Cuenta con motores a gas y motores a fuel oil. Se escogió esa planta por ser una fuente de alta contaminación para la ciudad.

Para analizar la contaminación provocada por la planta analizada fueron analizados los datos de las emisiones gaseosas de los años 2011 y 2012.

Además, para poder comparar las contaminaciones provocadas por los motores a gas con las contaminaciones de los motores que usan fueloil como combustible, tuvieron que

ser convertidos los datos de emisiones de ambos tipos de motores al mismo nivel de oxígeno usado durante las pruebas.

Para hacer la conversión de los datos a diferentes % de oxígeno fue utilizada la siguiente expresión:

$$C_c = C_{GAS} \times \frac{(21 - O_{REF})}{(21 - O_{MED})} \quad (8)$$

$C_c$  – Concentración corregida expresada al % de oxígeno especificado.

$C_{GAS}$  – Concentración del gas corregida (con los valores obtenidos en las verificaciones).

$O_{REF}$  – Oxígeno de referencia, o sea al que tienen que referirse las medidas.

$O_{MED}$  – Oxígeno medio durante las mediciones.

También fue necesario establecer el mismo sistema de unidades para algunos de los valores.

En la Tabla 9 se ofrece una comparación del índice de emisiones de los motores a gas y de los motores a fueloil de la planta analizada.

En la Tabla 10 y en la Fig. 1 se muestra el índice de emisiones de los motores a gas de la planta estudiada.

Tabla 9. Comparación de las emisiones (Índice de emisiones) entre los motores a gas y los motores a fueloil de la planta estudiada.

Índice de Emisiones	Fueloil	Gas
Partículas mg/m <sup>3</sup>	201,4071429	76,57
Dióxido de Azufre mg/m <sup>3</sup>	369,54	0
Oxígeno % a mg/m <sup>3</sup>	230534,6	80490
Dióxido de Nitrógeno mg/m <sup>3</sup>	405,09	315,0
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) % a mg/m <sup>3</sup>	127256,7	86400
Monóxido de carbono CO ppm a mg/m <sup>3</sup>	98,14	327,525
Monóxido de Nitrógeno mg/m <sup>3</sup>	1500,4	105
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> como NO <sub>2</sub> ) (mg/m <sup>3</sup> )	2369,57	400,44
Hidrocarburos Totales (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> ) de % a (mg/m <sup>3</sup> )	756	1688,81

Fuente: Los autores.

Tabla 10.

Índice de emisiones de los motores a gas de la planta (los motores 8 y 13 estaban fuera de servicio)

Motor a gas	Índice de Emisiones
UGGN N°1	54,21
UGGN N°2	80,59
UGGN N°3	87,79
UGGN N°4	80,58
UGGN N°5	95,74
UGGN N°6	113,05
UGGN N°7	91,95
UGGN N°8	Fuera de Servicio
UGGN N°9	72,73
UGGN N°10	90,83
UGGN N°11	86,04
UGGN N°12	66,76
UGGN N°13	Fuera de Servicio
UGGN N°14	87,10
UGGN N°15	51,28
UGGN N°16	61,84
UGGN N°17	86,08
UGGN N°18	80,64
UGGN N°19	89,80
UGGN N°20	92,56
UGGN N°21	95,59
UGGN N°22	93,27
UGGN N°23	83,06

Fuente: Los autores.

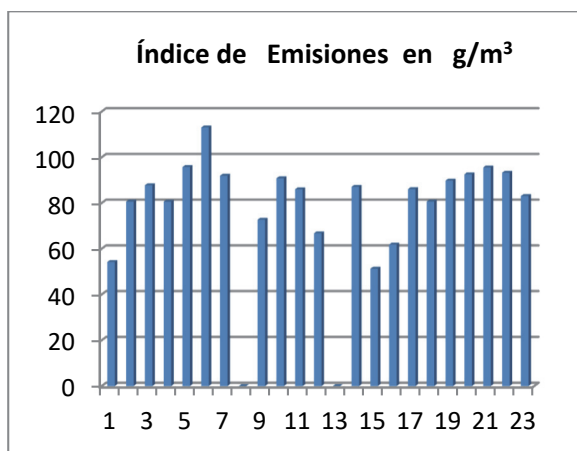


Figura 1. Índice de emisiones de los motores a gas de la planta (los motores 8 y 13 estaban fuera de servicio)  
Fuente: Los autores.

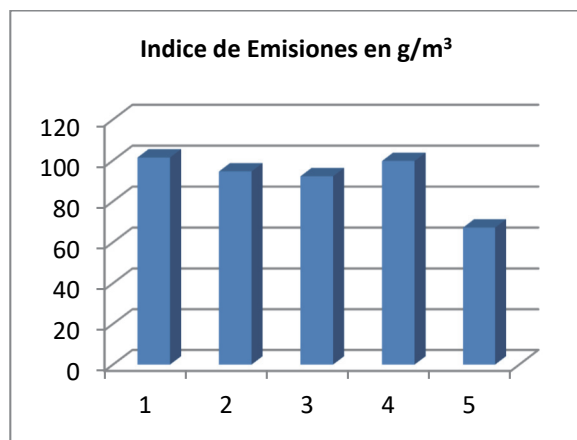


Figura 2. Índice de emisiones de los motores a fueloil de la planta.  
Fuente: Los autores.

Tabla 11.

Índice de emisiones de los motores a gas de la planta (los motores 8 y 13 estaban fuera de servicio)

Motor a fueloil	Índice de Emisiones
MAN1	101,42
MAN2	94,63
MAN3	92,26
MAN4	99,73
MAN5	67,17

Fuente: Los autores.

En la Fig. 2 y en la Tabla 11 se muestra el índice de emisiones de los motores a fueloil de la planta.

## 7. Índice específico de Emisiones de los motores de la planta estudiada

En la Tabla 12 y en la Fig. 3 se ofrece una comparación del índice de emisiones específico de los motores a gas y de los motores a fueloil de la planta analizada para cada tipo de contaminante.

Tabla 12.

Comparación de las emisiones (Índice específico de emisiones) entre los motores a gas y los motores a fueloil de la planta estudiada.

Tipo de Contaminante	Índice específico de emisiones	
	Fueloil	Gas
Partículas mg/Nm <sup>3</sup>	10,6564	22,3236
Dióxido de Azufre mg/Nm <sup>3</sup>	19,5523	0
Oxígeno % a mg/Nm <sup>3</sup>	12197,5	23466,7
Dióxido de Nitrógeno mg/Nm <sup>3</sup>	21,4333	91,8571
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) % a mg/Nm <sup>3</sup>	6733,16	25189,5
Monóxido de carbono CO ppm a mg/Nm <sup>3</sup>	5,19310	95,4885
Monóxido de Nitrógeno mg/Nm <sup>3</sup>	79,3877	30,6122
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> como NO <sub>2</sub> ) (mg/Nm <sup>3</sup> )	125,374	116,7463
Hidrocarburos Totales (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> ) de % a (mg/Nm <sup>3</sup> )	40	492,3657

Fuente: Los autores.

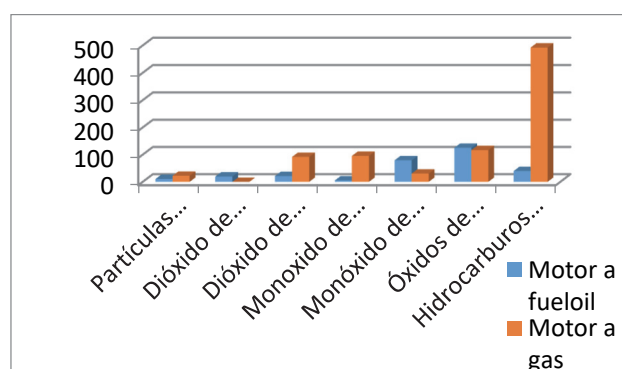


Figura 3. Índice específico de emisiones de los motores de la planta. Fuente: Los autores.

## 8. Análisis de los resultados

El índice de emisiones de los motores a gas de la planta es muy diferente entre todos los motores de la planta, inclusive los motores a gas emiten partículas, aspecto que de acuerdo a la literatura consultada no es admisible. Esta situación señalada anteriormente se debe al estado técnico de los motores a gas, muchos de los cuales queman aceite junto con el gas y de ahí las partículas en los gases de escape.

En el caso de los motores a fueloil, la diferencia del índice de emisiones entre los diferentes motores no es tan apreciable como en el caso de los motores a gas.

De la Fig. 3 se puede apreciar que en sentido general los motores a fueloil de la planta tienen un índice específico de emisiones menor que el de los motores a gas, es decir los motores a fueloil emiten menos contaminantes con relación a la potencia que entregan.

## 9. Conclusiones

En el trabajo se ofreció un análisis de los trabajos en el área de despacho económico-ambiental. Se analizaron varias técnicas destinadas a reducir las emisiones a la atmósfera debido a la generación de energía eléctrica. De todas las técnicas, la que menor inversión requiere es la de realizar un despacho de carga con emisiones mínimas.

Se desarrolló un nuevo método para evaluar la contaminación

ambiental producida por una planta generadora de electricidad. Este método a diferencia de los existentes en la literatura, no le asigna un valor de costo a las emisiones, sino que se parte de un índice total que tiene en cuenta no el costo, sino la importancia de cada emisión para la salud humana y para el medio ambiente. Para poder realizar comparaciones entre diferentes motores y combustibles se desarrolló el concepto de índice específico de emisiones que no es más que el índice de emisiones dividido por la potencia generada por el motor. El procedimiento matemático desarrollado se aplicó a un estudio de caso de una planta generadora de electricidad en la ciudad de Manaus en Brasil. Los resultados obtenidos fueron altamente satisfactorios y validan el procedimiento desarrollado. Se pudo apreciar del estudio de caso que el valor del índice de emisiones varía para los diferentes motores de la planta. Sus valores oscilan entre 54 y 102 g/m<sup>3</sup>

### Agradecimientos:

Al Instituto de Tecnología y Educación Galileo del Amazonas (ITEGAM), a la Universidad Federal de Pará (UFPA) y a la Universidad del Estado del Amazonas (UEA).

### Referencias

- [1] Bellhouse GM, Whittington H.W., Simulation of gaseous emissions from electricity generating plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 1996. DOI: 10.1016/0142-0615(96)00010-5
- [2] Toro-Gómez M.V., Quiceno-Rendón D.M., Energy demand and vehicle emissions estimate in Aburra Valley from 2000 to 2010 using LEAP model. *Dyna*, 2015. DOI: 10.15446/dyna.v82n189.41991
- [3] Oliveira, B.F.Ad., Ignotti, E., Hacon, S.S., A systematic review of the physical and chemical characteristics of pollutants from biomass burning and combustion of fossil fuels and health effects in Brazil. *Cadernos de Saúde Pública* (27), pp. 1678-1698, 2011. DOI: 10.1590/S0102-311X2011000900003
- [4] Tton Agence UEP. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). 2006
- [5] Binkou, A, Yu, Y., A novel formulation of optimal hydrothermal power flow. *Proceedings-Chinese Society of Electrical Engineering*, (28), 2008.
- [6] Yalcinoz, T., Altun, H., Environmentally constrained economic dispatch via a genetic algorithm with arithmetic crossover. *African Conference in Africa*, 2002 IEEE AFRICON 6th 2002. DOI: 10.1109/AFRCON.2002.1160037
- [7] Skjærseth, J.B., Wettstad, J., EU emissions trading: initiation, decision-making and implementation: Ashgate Publishing, Ltd.; 2008
- [8] Vourc'h, A., Jimenez, M., Enhancing environmentally sustainable growth in finland economics department working papers No. 229. DOI: 10.1787/370.821.866.730
- [9] Catalão, J., Mariano, S., Mendes, V., Ferreira, L., Profit-based unit commitment with emission limitations: A multiobjective approach. *Power Tech*, 2007 IEEE Lausanne 2007. DOI: 10.1109/PCT.2007.4538523
- [10] Kockar, I., Conejo, A.J., McDonald, J.R., Influence of the emissions trading scheme on generation scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (31), pp. 465-473, 2009. DOI:10.1016/j.ijepes.2009.07.001
- [11] Yamin, H., El-Diwairi, Q., Shahidehpour, S., A new approach for GenCos profit based unit commitment in day-ahead competitive electricity markets considering reserve uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (29), pp 609-616, 2007. DOI: 10.1016/j.ijepes.2006.09.004
- [12] Friedlander, G.D., Power, pollution, and the imperiled environment II. East, Midwest, and West Coast: pollution-control plans of some major utilities; role of government in environmental matters; other proposed systems for reducing stack emissions. *Spectrum, IEEE* (7), pp. 65-75, 1970.
- [13] Liu, X., Lin, B., Zhang, Y., Sulfur dioxide emission reduction of power plants in China: current policies and implications. *Journal of Cleaner Production*, 2015. DOI:10.1016/j.jclepro.2015.12.046
- [14] Sethi, M., Location of greenhouse gases (GHG) emissions from thermal power plants in India along the urban-rural continuum. *Journal of Cleaner Production*, 103, pp. 586-600, 2015. DOI:10.1016/j.jclepro.2014.10.067
- [15] Chemick, P., Caverhill, E., Methods of valuing environmental externalities. *The Electricity Journal*, 4, Pp. 46-53, 1991. DOI:10.1016/1040-6190(91)90171-O
- [16] Bernow, S., Biewald, B., Marron, D., Full-cost dispatch: incorporating environmental externalities in electric system operation. *The Electricity Journal*, 4, pp. 20-33, 1991. DOI:10.1016/1040-6190(91)90168-S
- [17] Holstein, M.P., Brands, W.J., Impacts on least cost planning and system operations of monetizing environmental externalities. *Proceedings of the American Power Conference*; (United States), 54. 1992.
- [18] Hess, S.W., Parker, J.E., Alms, K.D., Lee, J.T., Malone, M.J., Planning System Operations to Meet NOx Constraints. *IEEE Comp Applic in Power*, 5, pp. 10-14, 1992.
- [19] Hobbs, B.F., Emissions dispatch under the underutilization provision of the 1990 US Clean Air Act Amendments: models and analysis. *Power Systems*, IEEE Transactions on, 8, pp. 177-183, 1993. DOI: 10.1109/59.221263
- [20] Arya, L., Choubé, S., Kothari, D., Emission constrained secure economic dispatch. *International journal of electrical power & energy systems*, 19, pp. 279-285, 1997. DOI:10.1016/S0142-0615(96)00043-9
- [21] Chiang, C.-L., Optimal economic emission dispatch of hydrothermal power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29, pp. 462-469, 2007. DOI:10.1016/j.ijepes.2006.11.004
- [22] Muslu, M., Economic dispatch with environmental considerations: tradeoff curves and emission reduction rates. *Electric Power Systems Research*, 71, pp. 153-158, 2004. DOI 10.1016/j.epr.2004.01.009
- [23] Aydin, D., Özyön, S., Yaşar, C., Liao, T., Artificial bee colony algorithm with dynamic population size to combined economic and emission dispatch problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 54, pp. 144-153, 2014. DOI:10.1016/j.ijepes.2013.06.020
- [24] Hooshmand, R.-A., Parastegari, M., Morshed, M.J., Emission, reserve and economic load dispatch problem with non-smooth and non-convex cost functions using the hybrid bacterial foraging-Nelder-Mead algorithm. *Applied Energy*, 89, pp. 443-453, 2012.
- [25] Bhattacharya, A., Chattopadhyay, P.K., Solving economic emission load dispatch problems using hybrid differential evolution. *Applied Soft Computing*, 11, pp. 2526-2537, 2011. DOI:10.1016/j.asoc.2010.09.008

**N. Mustafá-Moraes**, Profesora de la Universidad del Estado de Amazonas. Coordina el Curso de Matemáticas. Desarrolla la investigación en sistemas de potencia. También actúa como investigadora en el ITEGAM (Instituto de Tecnología de la Amazonia Galileo). Graduada en Licenciatura en Matemáticas por la Universidad Federal del Amazonas - UFAM (1998), Especialista en Metodología de la Educación Superior - UFAM (2002), Maestría en Matemática Pura en la Universidad Federal del Amazonas - UFAM (2005) y Doctor en Ingeniería Eléctrica la Universidad Federal de Pará, con énfasis en los sistemas de energía eléctrica. Orcid :0000 0002 7060 2483

**U. Holanda-Bezerra**, Dr. en Ingeniería Eléctrica en 1988, de la Universidad Federal de Rio de Janeiro (COPPE / UFRJ), Brasil. Es profesor en el Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática UFPA desde 1977. ORCID: 0000/0002/2853/8676.

**J.L. Moya-Rodríguez**, Graduado de Ing. Mecánico en 1974 en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, de MSc. en Fiabilidad en 1985 en la UT "Otto Von Guericke" de Alemania y Dr. en Ciencias Técnicas en 1994 en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Ha trabajado como profesor de Postgrado en diferentes universidades de México, Brasil, Nicaragua y España. Posee varios premios de la Academia de Ciencias de Cuba y es Profesor de Mérito de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Tiene más de 300 artículos publicados en revistas y memorias de eventos. Es miembro de la ASME. Coordina las Maestrías de Ingeniería Mecánica y de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Tiene varios libros publicados. Es miembro del Tribunal Nacional de Defensas de Doctorado de la Rama Mecánica. Ha sido tutor de 27 tesis de doctorados y de 47 tesis de maestrías, todas ellas defendidas exitosamente. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0541-0191>

**J. Cabral-Leite**, Dr. en Ingeniería Eléctrica en 2013 de la Universidad Federal de Pará (UFPA), Brasil. Profesor e Investigador de ITEGAM. Manaus. Amazonas. Brasil. ORCID: 0000/0002/1337/3549.