

## **Procedimiento para la evaluación de motores de generación bajo condiciones ambientales locales**

### *The direction of the generation machine under environmental conditions*

**María Elizabeth Urbina Muñoz<sup>1</sup>**

#### **RESUMEN:**

Durante el uso de motor de combustión interna (MCI) de grupos electrógenos es importante la evaluación operacional de estos para verificar su comportamiento durante la explotación a la que son sometidos. Para el desarrollo del procedimiento se tuvieron en cuenta expresiones teóricas y empíricas, relacionadas con los métodos de selección y ajuste de motores de combustión interna en condiciones ambientales específicas, obtenidos a partir de la consulta realizada en las bibliografías existentes, principalmente la norma ISO 3046-1. Se estableció el procedimiento de análisis índice de consumo y la potencia de servicio del grupo electrógeno bajo condiciones climatológicas del sitio. Se determina que en condiciones normales atmosféricas las variables climatológicas no tienen gran influencia en la variación de la potencia de servicio y el índice de consumo de combustible, no siendo así en las condiciones de elevada humedad y altura de referencia sobre el nivel del mar. El objetivo se basa en las condiciones de referencias estándar y método de declaración de potencia y consumo de combustible.

**Palabras claves:** motores de combustión interna (MCI), consumo de combustible, parámetros ambientales, potencia.

#### **ABSTRACT:**

During the use of reciprocating internal combustion (RIC) engine of generating sets, the operational evaluation of these to verify their behavior during the operation to which they are subject is important. For the development of the procedure, theoretical and empirical expressions related to the methods of selection and adjustment of internal combustion engines were considered in specific environmental conditions, obtained from the consultation carried out in the existing bibliographies, mainly ISO 3046 – 1. We established the procedure of analysis of consumption index and the service power of the generating set under the climatological conditions of the site. It is determined that under normal atmospheric conditions the climate variables do not have a great influence on the variation of the service power and the fuel consumption index, although this is not the case in high humidity and reference altitude conditions above sea level. The objective it based on standard reference conditions and method of declaration of power and fuel consumption.

**Keywords:** Reciprocating internal combustion (RIC) engines, fuel consumption, environmental parameters, power.

Recibido 12 de octubre del 2017; revisión aceptada 12 de noviembre del 2017

---

<sup>1</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador, [marely\\_urbina@hotmail.com](mailto:marely_urbina@hotmail.com) .

## 1. INTRODUCCIÓN

En las facilidades petroleras a nivel mundial, la energía eléctrica constituye el principal recurso para la operación de extracción, separación, bombeo y transporte de petróleo. La importancia en el control de los parámetros de funcionamiento de los grupos electrógenos es esencial en la operación eficiente de generación de electricidad.

Los campos petroleros del Ecuador cuentan con plantas de generación eléctrica centralizada, con moto generadores Wartsila 18V32; de la literatura de motores de combustión ciclo diésel, se conoce que aproximadamente el 30% de la energía perdida corresponde a los gases de escape, agudizado por los cambios en condiciones ambientales locales diferentes a las condiciones de diseño de los mismos. Mediante el análisis de los costos operativos y de mantenimiento, se conduce a la determinación de los principales parámetros de funcionamiento, relacionados con la calidad de combustible, el régimen de trabajo y los ciclos de mantenimiento.

Al no realizar la evaluación de los parámetros de funcionamiento en función de la calidad del combustible y parámetros climatológicos, se tiene como resultado una operación ineficiente relacionándose con la explotación de los equipos.

Por los motivos antes expuesto se debe implementar un procedimiento para la operación eficiente relacionado con las características del combustible y los parámetros nominales de funcionamiento de los motores Wartsila 18V32.

Teniendo en cuenta la situación problemática antes mencionada se declaró como problema científico a resolver en esta investigación:

¿Cómo afecta la falta de procedimientos de la evaluación de los principales parámetros de funcionamiento de los motores de combustión interna en la operación y el rendimiento de los equipos electrógenos Wartsila 18V32 utilizados para la generación eléctrica en el Bloque 12 de la empresa Petroamazonas EP?

En este caso se tiene como objetivo general:

Proponer un procedimiento para la evaluación de los parámetros de funcionamiento y su incidencia con la operación y rendimiento de los motores de combustión interna Wartsila 18V32 a diferentes cargas, en función de la calidad del combustible.

La falta de la evaluación de los parámetros de operación de los motores de combustión interna Wartsila 18V32 en función de las propiedades de combustible y teniendo en cuenta las

condiciones ambientales locales, es un impedimento para establecer los parámetros eficientes de funcionamiento y ciclo de vida de los equipos.

Las plantas industriales que han implementado las normas de calidad ó a su vez se manejan bajo las buenas prácticas de la industria, acostumbran llevar una línea base del comportamiento de los equipos en cuando a mantenimiento, en la actualidad esto está asociado a la norma PAS 55 que se refiere a la gestión de activos (Asset Management) en las diferentes etapas del ciclo de vida, que va desde la concepción de un activo, la ingeniería (diseño y construcción), operación, mantenimiento y mejoramiento hasta la desincorporación del activo.

Petroamazonas EP siendo una empresa referente en el sector petrolero, en la cual los estándares en cuanto a calidad, cumplimiento de normativas legales, responsabilidad social, y la responsabilidad con el ambiente son altas prioridades, esto obliga a desarrollar e implementar permanentemente mejores controles para la optimización de recursos, por lo tanto se considera muy práctico y oportuno el establecer una línea base operativa, sobre el comportamiento de la operación y rendimiento de los motores de combustión interna W18V32 en la planta de generación eléctrica.

## **2. METODOLOGÍA**

Determinar el comportamiento de los principales parámetros de los MCI de grupos electrógenos, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas locales y los parámetros efectivos que caracterizan el trabajo de los motores, contribuye significativamente a la mejora continua de la eficiencia operativa [1-3]. El procedimiento propuesto se orienta a determinar resultados a partir de las siguientes metodologías:

1. Metodología de cálculo de los parámetros indicados y efectivos.
2. Índice de Generación del motogenerador.
3. Método de prueba en motores según norma ISO 3046-1.
4. Metodología para el análisis de las condiciones climatológicas.
5. Recálculo del índice de consumo de combustible en prueba o condiciones ambientales del sitio para motores ajustado.

Metodología de cálculo de los parámetros indicados y efectivos:

Para elaborar la metodología de cálculo, se utilizaron las expresiones contenidas en [4, 5].

### Parámetros indicados y efectivos

La presión media indicada  $p_{mi}$  se calcula por:

$$p_{mi} = \frac{N_i}{Z \cdot V \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{1}{2}}; \left( \frac{N}{m^2} \right) \quad (1)$$

Siendo:

$N_i$ : Potencia indicada del motor; (kW).  $Z$ : Número de cilindros del motor.  $V$ : cilindrada en ( $m^3$ ).  $n$ : Número de revoluciones del cigüeñal; (rev/min).

Para el cálculo de la presión media efectiva  $p_{me}$  se propone:

$$p_{me} = \frac{N_e}{Z \cdot V \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{1}{2}}; \left( \frac{N}{m^2} \right) \quad (2)$$

Donde:

$N_e$ : Potencia efectiva del motor; (kW).

Se puede obtener el trabajo indicado  $W_i$ :

$$W_i = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C \cdot p_{mi}; (J) \quad (3)$$

Donde:

$D$ : Diámetro del cilindro; (m).  $C$ : Carrera del pistón; (m).

La ecuación para el trabajo efectivo  $W_e$  es:

$$W_e = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C \cdot p_{me}; (J) \quad (4)$$

El consumo indicado  $g_i$  y efectivo de combustible  $g_e$  se determina por las siguientes expresiones:

$$g_i = \frac{G_i}{N_i} \cdot 10^3; \left( \frac{g}{kW \cdot h} \right) \quad (5)$$

Donde:

$G_i$ : Gasto horario de combustible; ( $\frac{kg}{h}$ ).

$$g_e = \frac{G_e}{N_e} \cdot 10^3; \left( \frac{g}{kW \cdot h} \right) \quad (6)$$

El rendimiento indicado  $\eta_i$  se obtiene:

$$\eta_e = \frac{3600}{H_u \cdot g_i} \cdot 100; (\%) \quad (7)$$

Donde:

$H_u$  : Valor calórico bajo del combustible;  $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$ .

Rendimiento mecánico  $\eta_m$  :

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \cdot 100 \quad (8)$$

Rendimiento efectivo  $\eta_e$  :

$$\eta_e = \frac{\eta_i \cdot \eta_m}{100} \quad (9)$$

#### *Determinación del índice de consumo de combustible de la batería*

Se entiende por índice de consumo o consumo específico de energía a la cantidad de energía por unidad de producción o servicios, medidos en términos físicos (productos o servicios prestados) [6].

En un índice de consumo, el numerador será el portador energético primario o secundario, que se consume en el puesto en un determinado periodo, expresado en una unidad de medida de energía, (kW, Ton Fuel Oil, Ton de vapor, TEP.). El denominador reflejará el nivel de producción realizada o de servicio prestado en el puesto en el periodo dado, expresado en la unidad de medida que corresponda (unidades, toneladas).

$$Indice.Consumo = \frac{Consumo.Portador}{Producción.Realizada.(servicio.prestado)} \quad (10)$$

Para el caso en estudio, el índice de consumo se calcula por:

$$Ic = \frac{C}{G} \cdot \rho; (g/kW \cdot h) \quad (11)$$

Donde:

$C$  : Consumo de combustible;  $\left(\frac{kg}{h}\right)$ .  $G$  : Generación de energía;  $(kW \cdot h)$ .  $\rho$  : densidad del combustible;  $(g/cm^3)$ .

#### *Metodología para el análisis de las condiciones climatológicas*

Ajuste de potencia para condiciones ambientales:

Cuando se requiere que el motor sea operado bajo condiciones diferentes de las condiciones de referencias estándar dadas, y se requiere que la potencia de salida sea ajustada hasta o desde condiciones estándar de referencia, las siguientes ecuaciones pueden ser usadas si otro método no es establecido por el fabricante.

$$P_x = \alpha \cdot P_r \quad (12)$$

Donde:

$P_x$ : Potencia estándar de servicio; (kW).  $P_r$ : Potencia de referencia estándar ISO; (kW).

Donde el factor de ajuste de potencia esta dado por:

$$\alpha = k - 0,7 \cdot (1 - k) \cdot \left( \frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (13)$$

Donde:

$k$ : Razón de potencia indicada.

$$k = \left( \frac{P_x - a\phi_x \cdot p_{sx}}{P_r - a\phi_r \cdot p_{sr}} \right)^{0,7} \cdot \left( \frac{T_r}{T_x} \right)^{1,2} \cdot \left( \frac{T_{cr}}{T_{cx}} \right) \quad (14)$$

Siendo:

$\left( \frac{P_x - a\phi_x \cdot p_{sx}}{P_r - a\phi_r \cdot p_{sr}} \right)$  Relación de presión del aire seco.  $T_r$ : Temperatura media nacional; (° C).

$T_x$ : Temperatura del sitio; (° C).  $T_{cr}$ : Temperatura de referencia estándar ISO; (° C).  $T_{cx}$ : Temperatura de entrada del aire; (° C).

*Recálculo del índice consumo de combustible en prueba o condiciones ambientales del sitio para motores ajustado*

Cuando se requiere que el motor sea operado bajo prueba o condiciones ambientales del sitio, desde las condiciones de referencias estándar dadas, el consumo específico de combustible va a diferir del declarado para las condiciones de referencia estándar y podría ser calculado desde las condiciones de referencia estándar [7].

La siguiente ecuación podría ser utilizada si otros métodos no son declarados por el fabricante:

$$b_x = \beta \cdot b_r \quad (15)$$

Siendo:

$b_x$ : Consumo específico de combustible de servicio; ( $g/kW \cdot h$ ).  $\beta$ : Factor de ajuste de consumo.

$$\beta = \frac{k}{\alpha} \quad (16)$$

Resultados de caso de estudio:

Para la validación del procedimiento se ha realizado un estudio mediante el cálculo práctico de los parámetros operativos de un motor utilizado para la generación eléctrica en un grupo electrógeno, donde se han obtenido los siguientes resultados:

- Parámetros principales del motor

Con la aplicación de la metodología antes descrita y teniendo en cuenta los datos anteriores, se ofrece en la tabla 1 los resultados obtenidos en los cálculos.

**Tabla 1.** Resultados obtenidos en los cálculos.

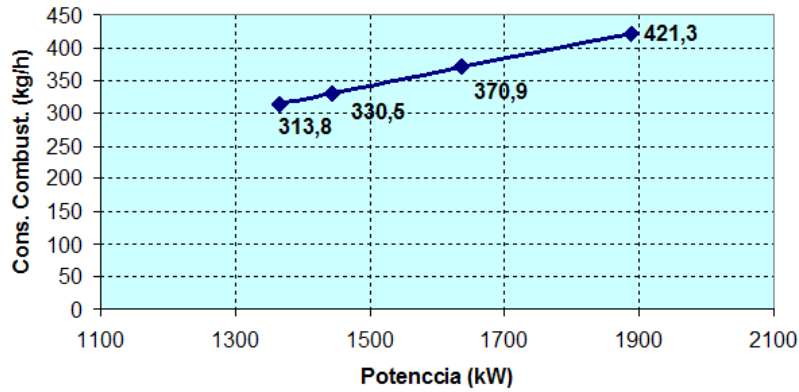
Parámetro	Unidad	Ecuación	% de carga del motor			
			75	80	90	100
$pme$	MPa	2	1,402	1,48	1,679	1,94
$We$	kJ	4	5,695	6,021	6,82	7,87
$ge$	$g/kW \cdot h$	6	229,14	228,88	226,71	223,14
$\eta_e$	%	9	26,7	28,2	32	36,9
$\eta_m$	%	8	68,6	72,6	82,2	94,9

- Obtención de las curvas características de carga

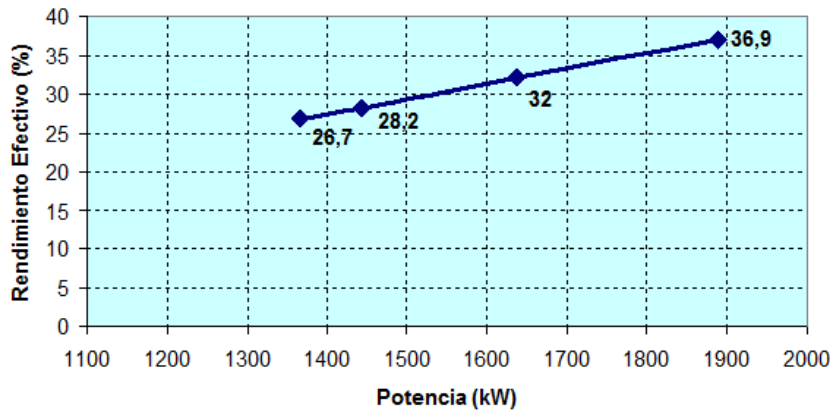
Posterior al cálculo de los parámetros se procede a la obtención de las curvas características de carga, en estas se incluye la curva de consumo horario y consumo específico efectivo de combustible, rendimiento efectivo y presión media efectiva del motor. Para ello se utiliza la siguiente tabla de datos:

**Tabla 2.** Datos para la construcción de los gráficos de carga.

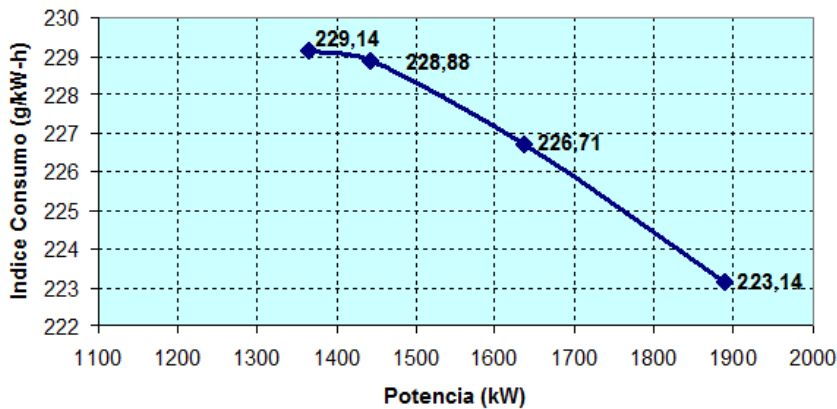
Carga (%)	Potencia efectiva (kW)	Consumo horario (kg/h)	Consumo específico ( $g/kW \cdot h$ )	Rendimiento efectivo (%)	Presión media efectiva (MPa)
75	1366	313,8	229,14	26,7	1,40
80	1444	330,5	228,88	28,2	1,48
90	1636	370,9	226,71	32	1,68
100	1888	421,3	223,14	36,9	1,92



**Figura 1.** Variación del consumo horario con respecto a la potencia efectiva.



**Figura 2.** Variación del rendimiento con respecto a la potencia efectiva.



**Figura 3.** Variación del índice de consumo de combustible con respecto a la potencia efectiva.

### 3. RESULTADOS

En las figuras 1 y 2 se muestra un aumento de los parámetros relacionados en cada caso (consumo horario de combustible, rendimiento efectivo) con respecto al incremento de la carga del motor. El rendimiento efectivo aumenta con respecto a la carga y el consumo específico efectivo disminuye (Figura 3), (ambos hasta aproximadamente el 80 – 85 % de la carga máxima) momento el cual alcanzan sus valores óptimos. Para valores superiores de carga el proceso de combustión se empeora a causa de la imperfección con que se forma la



mezcla. A consecuencia de esto, el rendimiento indicado disminuye bruscamente y esta disminución suya no se compensa con la elevación del rendimiento mecánico, lo que ocasiona un aumento del consumo específico de combustible.

Como indica la figura 1, el consumo horario de combustible es mayor a medida que aumenta el porcentaje de carga. Para la carga de 75 % corresponde el menor consumo de combustible, 313,8 kg/h; mientras que al 100 % de carga, el consumo aumenta en 421 kg/h. Eso está condicionado porque para aumentar el porcentaje de carga del motor se debe introducir una mayor cantidad de combustible para la combustión.

En todo lo anteriormente descrito está presente con su influencia la densidad del combustible, ésta depende, del crudo de origen y del tratamiento de refinería. Sin embargo, en los motores relativamente rápido que consumen gas-oil, la densidad tiene repercusión sobre la potencia y el consumo. Una división de reglaje de la bomba de inyección, corresponde a un cierto volumen de combustible inyectado por el ciclo, y por consiguiente a mayor densidad, la energía introducida al motor con el combustible es superior (el valor calórico se expresa en cal/kg de combustible). La densidad interviene aquí por su acción sobre el poder calórico por litro y puede haber interés sobre todo cuando la contabilidad del combustible se realiza sobre la base del precio unitario por volumen de utilizar un combustible suficientemente denso (lógicamente dentro de los límites permisibles para el tipo de combustible utilizado).

En la tabla 1, el aumento de la presión media efectiva, es el resultado de quemar más combustible por cada ciclo, el aumento de este parámetro no es significativo para el caso de los motores que cuentan con un sistema de sobrealimentación, encargado de bombear aire a la culata de cada cilindro, lo que implica una menor cantidad de combustible inyectado y un crecimiento de coeficiente de exceso de aire [4, 8].

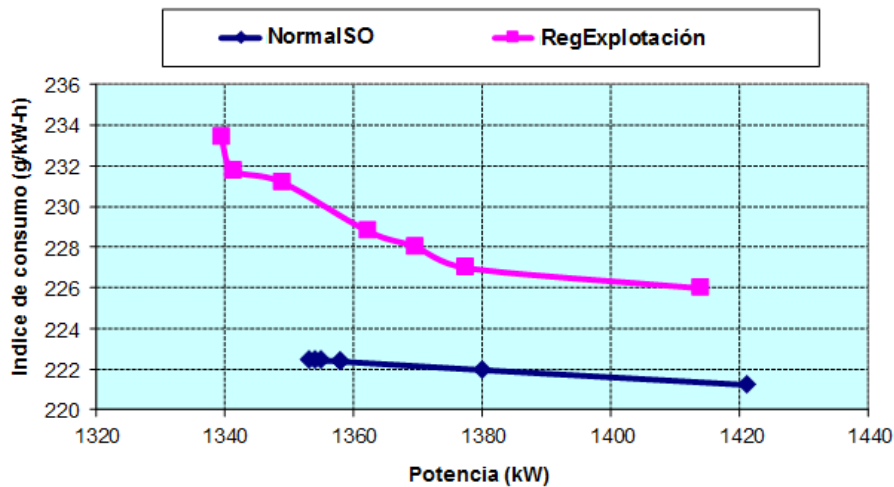
- Parámetros principales del grupo electrógeno en su interacción con el ambiente

Apoyándose en la metodología anteriormente descrita y teniendo en cuenta los datos que se ofrecen del clima y la explotación de la instalación, se ofrece en la tabla 2, con resultados obtenidos en los cálculos.

**Tabla 2.** Resumen de la batería según la norma ISO, y SCADA.

Mes/ Año-2016	Grupo Electrónico			
	Normas ISO 3046-1		SCADA	
meses	Potencia	Ic. Consumo	Potencia	Ic. Consumo
marzo	1421	221,22	1413,90	226,00
abril	1380	221,97	1377,50	227,00
mayo	1353	222,49	1369,70	228,04
junio	1358	222,40	1362,30	228,80
julio	1355	222,45	1348,97	231,20
agosto	1354	222,46	1341,40	231,80

La potencia y el índice de consumo según norma ISO 3046-1, por las ecuaciones 11 y 14. En el caso de los resultados obtenidos a partir del sistema SCADA, se determinaron en el panel de control y la ecuación 10.



**Figura 4.** Comportamiento de los índices de consumo de combustible en la batería con respecto a la potencia.

En la figura 4 se muestra una tendencia del índice de consumo de combustible a disminuir a medida que aumenta la carga de motor (potencia de servicio), lo cual es producto a la influencia que tiene la calidad del combustible, condicionada esta última por su densidad, y contenido de azufre que proporcionan una mejor combustión y aprovechamiento de la energía que porta el combustible.

La curva que muestra el comportamiento del índice de consumo corregido según la norma ISO 3046-1, tiene una leve tendencia a la disminución entre los valores de 221,22 y 222,49 g/kW·h, esto es porque está bajo la influencia de parámetros climatológicos como son la presión atmosférica (promedio de 101,556 kPa), humedad relativa (promedio 78,57 %) y temperatura del aire (promedio 26,27 °C); por no existir una gran dispersión de los valores se comporta como una recta. Cuando se analiza la interacción de estos parámetros con el trabajo del motor, se demuestra que están directamente relacionados con el rendimiento mecánico del motor ( $\eta_m$ ); a medida que aumenta el % de carga del motor aumenta el rendimiento mecánico, por ende disminuye el índice de consumo del motor, debido al acercamiento cada vez mayor de la potencia de servicio a la potencia declarada estándar.

#### 4. CONCLUSIONES

La norma ISO 3046-1; establece los fundamentos para el análisis de la potencia y el consumo de combustible de las instalaciones de generación distribuida bajo condiciones atmosférica locales sustentadas para motores de combustión interna; quedando establecido el procedimiento de cálculo para la determinación de los parámetros que caracterizan el motor.

Así como el método de ajuste de potencia y consumo de combustible de estos motores en la batería. El análisis de los resultados, basado en los parámetros efectivos del motor muestra que el rendimiento efectivo aumenta (26,7 hasta 36,9 %) con respecto a la carga debido a que se produce un mayor aprovechamiento de la energía que porta el combustible. El consumo específico efectivo disminuye desde 229,14 hasta 223,14 g/kW·h, aumentando la potencia efectiva del motor. En el caso del consumo horario del combustible aumenta considerablemente con el aumento de la potencia, debido a que se necesita inyectar a la cámara de combustión una mayor cantidad de combustible.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martínez, "Grupos electrógenos y su impacto ambiental," *Higiene y Sanidad Ambiental*, vol. 2, pp. 112-217, 2007.
- [2] *Resiprocating internal combustion engines - Performace- 3046-1.* , N. ISO Fifth edition, 2012.
- [3] Avallone and Baumeister, *Marks Manual of Mechanical*. Nuevo Mexico: McGraw-Hill, 1997.
- [4] Reyes, *Prácticas de motores de combustión interna*. La Habana: Pueblo y Educación, 1987.
- [5] Salinas, "Motores de combustión interna," Madrid: Paraninfo, 2008.
- [6] Córdova, "Estudio de un motor de combustión interna para determinar sus parámetros de funcionamiento," Universidad Técnica de Ambato, 2013.
- [7] Fires, *Termodinámica Técnica*. La Habana: Pueblo y Educación, 2002.
- [8] Palacios, "Análisis de la eficiencia de un motor de combustión interna utilizado para el funcionamiento de una planta eléctrica de 1 kW de potencia," Universidad de San Carlos de Guatemala, San Carlos, 2007.