

Diseño de una herramienta computacional para estudio de los motores a pistón^o

Design of a Computer tool for Reciprocating Engines Analysis

Recibido: 18 de mayo de 2017 - Aceptado: 21 de marzo de 2018

Para citar este artículo: L. Mónico y C. González, «Diseño de una herramienta computacional para estudio de los motores a pistón», *Ingenium*, vol. 19. no. 37, ene. - jun. 2018, pp. 77-86.»



Luisa Fernanda Mónico Muñoz*
Carlos González**

Resumen

Los motores de combustión interna surgen de la necesidad de brindar potencia y movimiento independientemente del animal o del ser humano. Con el paso del tiempo, dichos sistemas de propulsión han sido optimizados e implementados en diversos vehículos o máquinas.

Actualmente, con el propósito de aminorar los daños ambientales y brindar una mayor eficiencia, surge la necesidad de contar con una herramienta computacional más apropiada para diseñar motores a pistón para diferentes aplicaciones en los vehículos que lo utilizan. Este artículo muestra una herramienta computacional que permite estudiar el comportamiento de estos motores, a través de las teorías planteadas por diferentes autores expertos en las características operacionales de estas máquinas.

^o Artículo de investigación, producto derivado de investigación realizada en el grupo Aerothec de la Universidad de San Buenaventura, Bogotá

* Ph. D. en Sistemas Propulsivos en Medios de Transporte, Universidad Politécnica de Valencia. Profesora de tiempo completo, Universidad de San Buenaventura, Bogotá, e-mail: lmonico@usbbog.edu.co

** Ingeniero Aeronáutico, Universidad de San Buenaventura Bogotá, E-mail: cdgonzalez@academia.usbbog.edu.co

Palabras clave

Herramienta computacional, motores a pistón, curvas características, ciclo Otto, ciclo Diésel.

Abstract

Internal combustion engines arise from the need to provide power and movement independent of the animal or human. These propulsion systems over time have been optimized and implemented in several vehicles or machines.

Today, with the necessity of minimize environmental damage and provide greater efficiency, there is a need to find the most appropriate computer tool to design reciprocating engines for different applications in vehicles that use it. This paper, presents a computer tool that allows studying the behavior of these engines, based on the theory provided by different authors who are experts on the operational characteristics of these engines.

Keywords

Computer tool, reciprocating engines, characteristic maps, Otto cycle, Diesel cycle.

Introducción

Las herramientas computacionales en el campo de la ingeniería son una gran ayuda para complementar el proceso de investigación y de aprendizaje en las diversas aplicaciones físicas y matemáticas. Hoy en día son casi nulas las herramientas computacionales con enfoque en la comprensión teórico-práctica de los motores a pistón, de fácil asequibilidad para la academia y que, a su vez, permitan ser usadas como guía para propuestas de diseño. Este documento describe un programa computacional, con enfoque académico e investigativo, que permite realizar los cálculos básicos de diseño de los motores a pistón, como el desempeño mecánico y el análisis termodinámico preliminar a lo largo del funcionamiento. La parte motriz es considerada como un sistema mecánico que transforma energía química en energía mecánica [1].

Entre los antecedentes se encuentra la herramienta desarrollada en la Universidad Técnica Bauman Moscow State, DIESEL-RK [2]. Es una herramienta computacional que tiene como finalidad estudiar el comportamiento de los motores Diésel. Entre sus características se destacan la posibilidad de optimizar motores de dos y cuatro tiempos para mejorar la eficiencia y aumentar la potencia y diseño de los motores impulsados por biocombustibles, el análisis de combustibles y emisiones contaminantes, la predicción de las curvas características, la conversión de motores Diésel a motores a gas, entre otras características. La herramienta fue desarrollada con base en diferentes artículos publicados por la misma institución académica, y cuenta con un kit para desarrollo de «plug-ins». Sin embargo, a pesar de ser una herramienta gratuita, se limita solo al motor Diésel y no permite modificaciones de código por terceros, lo que implicaría que sea obsoleta a largo plazo.

Por su parte, ProRacing Sim ofrece la herramienta computacional denominada Dynomation-5 [3]. Esta tiene la habilidad de representar y analizar la parte dinámica del flujo de gases, graficar los efectos en la geometría del motor en general, analizar desde un motor con un cilindro hasta motores en V con 12 cilindros, ofrecer una vista de corte transversal del cilindro con animación en 3D del pistón en movimiento, añadir datos a las curvas características y evaluar la potencia por efectos de la variación en la eficiencia mecánica, generar un informe acerca de la simulación efectuada y modelar diferentes configuraciones para cámara de combustión, entre otros. No obstante, es altamente costosa por motivos de licenciamiento, aunque cuenta con un gran enfoque investigativo en la academia, por lo que es difícilmente asequible para el estudiante promedio o para licenciamiento por equipo en cualquier institución universitaria del medio.

Metodología

Para la correcta resolución del trabajo, el desarrollo se enfocó en las características básicas de los motores a pistón, desde la geometría de las piezas fundamentales hasta las variables termodinámicas relevantes. A partir de la literatura y la recolección de información de especificaciones de diversos motores reales se obtuvo una lista de ecuaciones relevantes para el modelado del comportamiento de estos y, de esta forma, plantear la base para la escritura de las instrucciones a efectuar.

Luego se inició con el diseño y flujo de la herramienta computacional, para lo cual fue necesario definir el área de trabajo y la interfaz gráfica. Posteriormente, se escribieron los algoritmos pertinentes al cálculo de las variables definidas y se efectuó la validación del modelo matemático, traducido en código computacional, para comprobar por medio de un problema de diseño los valores arrojados, además, si estos son lógicos o no y se ajusta el código. Una vez finalizado el proceso de desarrollo de los complementos a incluir, estos se aplicaron en el área de trabajo definida; así se procedió a establecer los parámetros de modificaciones que se puedan realizar a la herramienta por parte de terceros.

Finalmente, se efectuó la redacción de un manual del usuario en formato web actualizable, donde se explica al usuario final todo sobre el uso de esta herramienta, cómo obtener los resultados esperados y cómo generar acciones alternativas y/o adicionales a manera de aporte a la herramienta computacional; así mismo, se creó un tutorial que los usuarios puedan seguir para realizar un problema de diseño en pocos y simples pasos, así como documentación que facilite el desarrollo e incorporación de nuevas modificaciones derivadas y la lectura de resultados de proyectos generados por terceros externos bajo la modalidad de compartir información. En la Fig. 1 se presenta por medio de un diagrama de flujo la metodología desarrollada en este trabajo.

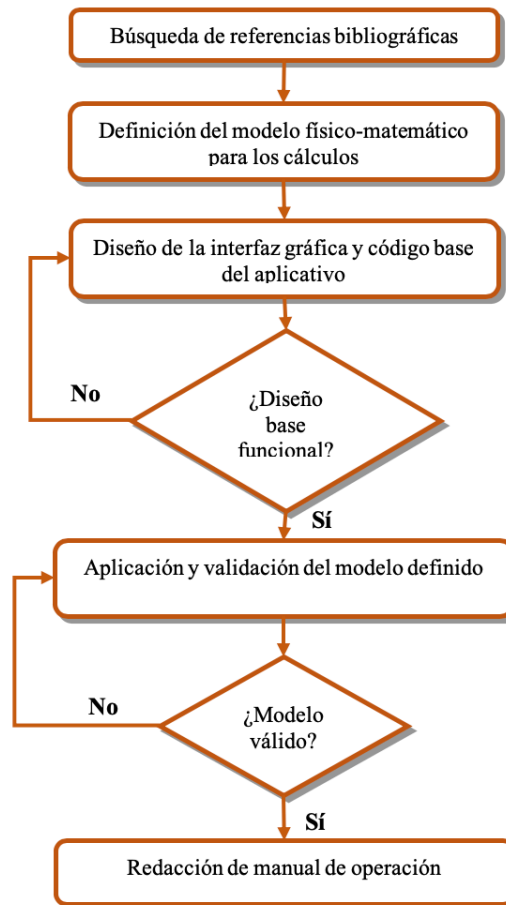


Fig. 1. Metodología desarrollada.

Descripción de la herramienta computacional

La herramienta computacional *ICE Solver*, la cual usa los lenguajes Visual BASIC, cuenta con una interfaz gráfica en donde se insertan los datos de entrada que corresponden a la configuración geométrica y operacional del motor; posteriormente, se obtienen los resultados de parámetros efectivos, termodinámicos y de rendimiento general del motor. Para calcular lo anterior, se insertan los siguientes datos en el programa.

Geometría: diámetro del cilindro (B), carrera (S), longitud de biela, relación de compresión (r_c) o volumen de la cámara de combustión (V_c), régimen nominal del motor en revoluciones por minuto, el número de cilindros, ciclo de operación (Otto o Diésel) y tiempos del motor (2T o 4T). En la Fig. 2 se presentan algunas de las variables geométricas nombradas anteriormente.

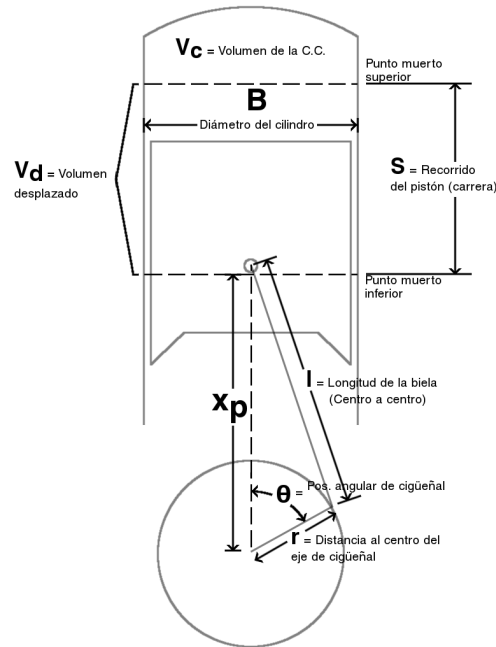


Fig. 2. Geometría del cilindro de un motor recíprocante [4], [5].

Operación: poder calorífico inferior (*low heating value*, en inglés) del combustible y relación aire-combustible (estos últimos pueden establecerse a partir de una lista de combustibles frecuentemente utilizados o se pueden establecer ambos valores manualmente si se utiliza un combustible diferente), porcentaje de residuos en la mezcla, eficiencia mecánica, eficiencia de la combustión, presión ambiente y temperatura ambiente.

Posteriormente, en la Fig. 3 se presenta el diagrama de flujo para la obtención de las variables requeridas y esenciales en el aplicativo.

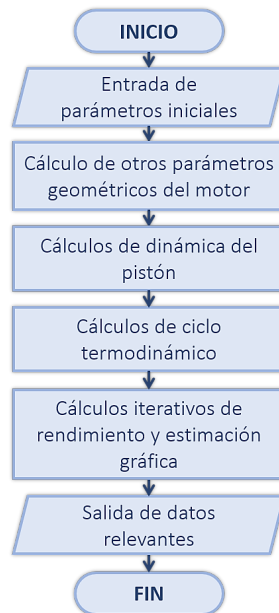


Fig. 3. Flujo de instrucciones de la herramienta computacional.

Descripción de la interfaz gráfica

La interfaz gráfica cuenta con una ventana principal (Fig. 4) para insertar los datos de entrada mencionados, guardarlos en el computador y abrirlos cuando se requiera. A su vez, cuenta con dos ventanas, una para visualizar los resultados de termodinámica en forma numérica, con la descripción respectiva de cada parámetro (Fig. 5), y otra para visualizar los diagramas de comportamiento dinámico del pistón, al igual que los diagramas de ciclo termodinámico (presión-volumen y temperatura-entropía) y las curvas de los parámetros efectivos (par y potencia, presión media y consumo de combustible) (Fig. 6).

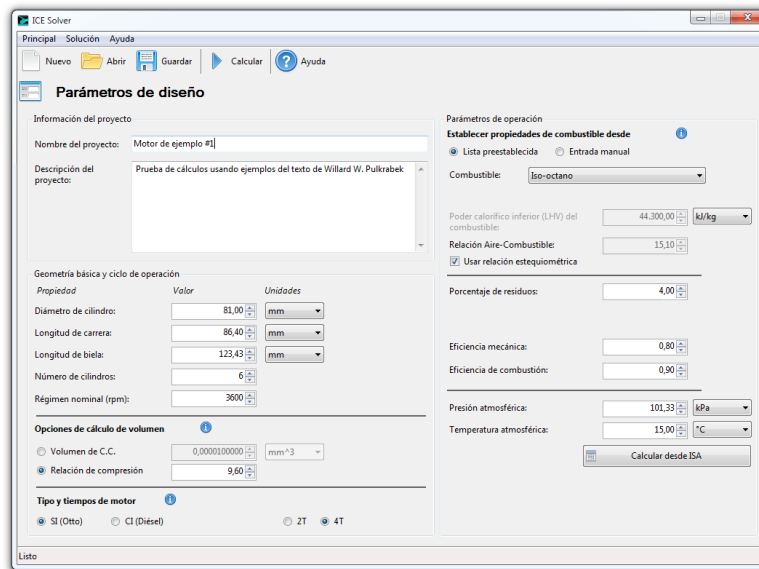


Fig. 4. Ventana principal de ICE Solver.

Propiedad	Símbolo	Valor (S. Métrico)	Unidades (S. Métrico)	Valor (S. Inglés)	Unidades (S. Inglés)
Geometría					
Relación B/S	B/S	0,93750		0,93750	
Velocidad promedio del pistón	U _{p,avg}	622,08000	m/s	2040,94086	ft/s
Defase del cigüeñal	a	0,04320	m	0,14173	ft
Área del pistón	A _p	5,15300e-03	m ²	5,54664e-02	ft ²
Volumen desplazado	V _d	4,45219e-04	m ³	1,57228e-02	ft ³
Volumen de la cámara de combustión	V _c	5,17696e-05	m ³	1,82823e-03	ft ³
Volumen total del motor	V _t	2,67131e-03	m ³	9,43366e-02	ft ³
Volumen del punto muerto inferior (BDC)	V _{BDC}	4,96989e-04	m ³	1,75510e-02	ft ³
Volumen del punto muerto superior (TDC)	V _{TDC}	5,17696e-05	m ³	1,82823e-03	ft ³
Relación de compresión	r _c	9,6		9,6	
Análisis Termodinámico					
Presión en la válvula de entrada	P _{in}	101,325	kPa	14,69598	psi
Temperatura en la válvula de entrada	T _{in}	288,15	K	518,67	R
Densidad en la válvula de entrada	ρ _{in}	1,22523e+00	kg/m ³	7,64884e-02	lbm/ft ³
Volumen en la válvula de entrada	V ₁	4,96989e-04	m ³	1,75510e-02	ft ³
Masa de la mezcla de gases	m _{mix}	6,08923e-04	kg	1,34244e-03	lbm
Masa de aire	m _{air}	5,48258e-04	kg	1,2087e-03	lbm
Masa de combustible	m _{fuel}	3,63085e-05	kg	8,00464e-05	lbm
Masa de residuos del ciclo anterior	m _{ex}	2,43569e-05	kg	5,36978e-05	lbm
Presión después de la compresión	P ₂	2403,78897	kPa	348,64075	psi
Temperatura después de la compresión	T ₂	712,07726	K	1281,73907	R
Volumen después de la compresión	V ₂	5,17696e-05	m ³	1,82823e-03	ft ³
Entropía de compresión isentrópica	Δs ₁₂	0,00000	J/kg.K	0,00000	BTU/lbm.R
Presión después de la combustión	P ₃	1358,86419	kPa	1970,90168	psi
Temperatura después de la combustión	T ₃	4025,44536	K	7245,80166	R

Fig. 5. Ventana de resultados numéricos.

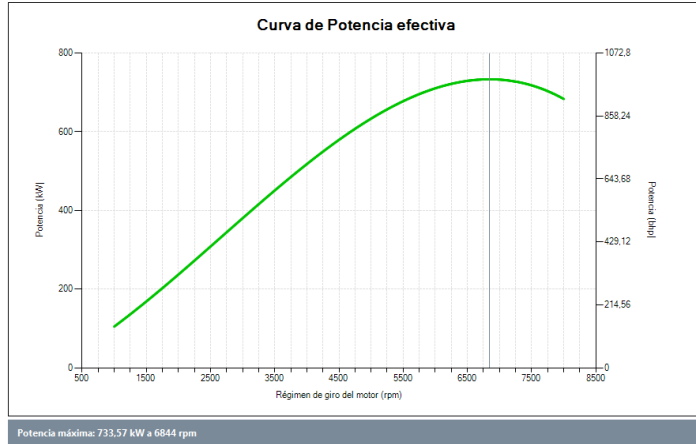


Fig. 6. Ejemplo de curva de los resultados de los parámetros efectivos del motor.

Resultados

Para validar los resultados estimados por la herramienta computacional, han sido seleccionados dos motores, uno Diésel y otro a gasolina. El primero es el motor Isuzu IT4-4LE1 de uso industrial y el otro es el Dodge Viper SRT modelo 2009. Se presentan a continuación en la Tabla 1 las especificaciones de ambos motores y sus respectivas curvas de rendimiento.

Tabla 1. Especificaciones de los motores a validar

Especificaciones de los motores		
	Isuzu IT4-4LE1	Dodge Viper SRT 2009
Diámetro de cilindro x carrera	85 x 96 mm 3.19 x 3.76 in	103.0 x 100.6 mm 4.05 x 3.96 in
Tipo de motor	Motor Diésel 4T, con 4 cilindros en línea. Motor de aspiración natural	Motor a gasolina 4T, con 10 cilindros en V. Motor de aspiración natural
Volumen desplazado total	2.18 L	8.4 L
Relación de compresión	21.5:1	10.2:1
Par motor máximo	103 ft·lb (140 N·m) a 1800 rpm	560 ft·lb (760 N·m) a 5000 rpm
Potencia máxima	48.1 BHP (35.9 kW) a 2600 rpm	600 BHP (450 kW) a 6100 rpm
Uso o aplicación	Industrial	Automotriz

En el aplicativo, las ecuaciones para la obtención de las curvas características de rendimiento [4] y [5] son las que se muestran a continuación:

$$N_e(n) = \left(\frac{W_{net} n N z n_M}{i} \right) \left[0.435 \left(\frac{n}{n_N} \right) + 0.3325 \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 - 0.125 \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 \right] \text{ [kW]} \quad (1)$$

$$T_e \text{ [N·m]} = 9552 \times \frac{N_e \text{ [kW]}}{n \text{ [rev/min]}} \quad (2)$$

$$b_{mep} \text{ [kPa]} = \frac{2\pi i \text{ [rev/ciclo]} \times T_e \text{ [N·m]}}{V_d \text{ [L]}} \quad (3)$$

$$b_{sfc} \text{ [g/kWh]} = \frac{\dot{m}_{fuel} \text{ [g/h]}}{N_e \text{ [kW]}} = \frac{\dot{m}_{fuel} \text{ [g/cil·ciclo]} z \text{ [cil]} n \text{ [rev/h]}}{i \text{ [rev/ciclo]} N_e \text{ [kW]}} \quad (4)$$

Donde:

N_e es la potencia obtenida en función del régimen de giro;

T_e es el par motor en función del régimen;

b_{mep} es la presión media efectiva;

$bsfc$ es el consumo específico de combustible;

W_{net} es el trabajo neto, expresado en kilojoules (kJ);

z es el número de cilindros del motor;

η_M es el rendimiento mecánico del motor;

i es la cantidad de vueltas (revoluciones) del cigüeñal por cada ciclo. En motores de dos tiempos, i equivale a 1. En motores de cuatro tiempos, i es 2;

n es el régimen de giro actual del motor, expresado en rpm;

n_N es el régimen de giro nominal del motor, expresado en rpm;

m_{fuel} es la masa de los gases de combustible por cilindro, por ciclo.

Para iniciar la validación de los resultados, se ingresan los datos de entrada de cada motor en la interfaz de la herramienta computacional *ICE Solver*. Luego se ejecutan los cálculos y se obtiene un tentativo de las curvas de par y potencia.

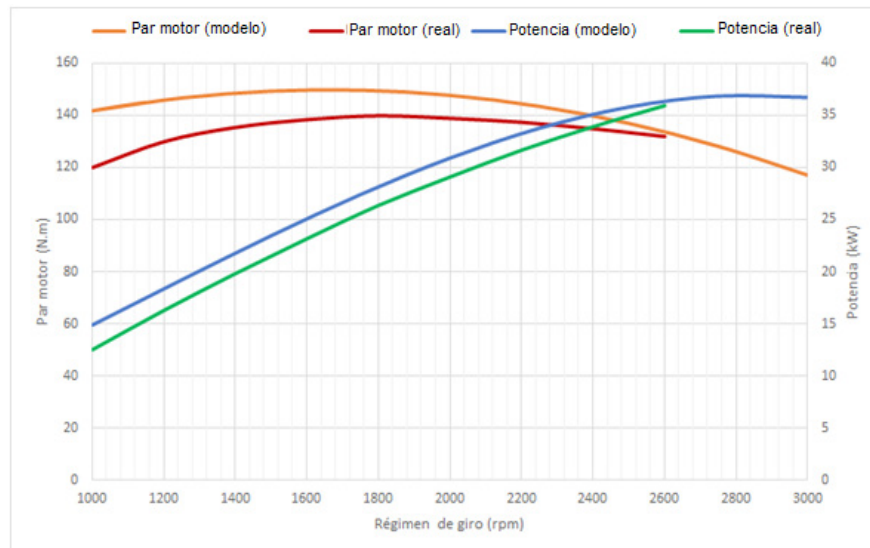


Fig. 7. Comparación entre curvas de par y potencia del modelo y reales del motor Isuzu IT4-4LE1.

Utilizando los datos calculados en el aplicativo y los datos reales se obtienen, entonces, los márgenes de error:

$$\%_{err, T_{e,max}} = \frac{149.72 \text{ N}\cdot\text{m} - 140.0 \text{ N}\cdot\text{m}}{149.72 \text{ N}\cdot\text{m}} \times 100\% = 6.49\% \quad (5)$$

$$\%_{err, N_{e,max}} = \frac{36.99 \text{ kW} - 36.0 \text{ kW}}{36.99 \text{ kW}} \times 100\% = 2.95\% \quad (6)$$

$$\%err, n_{T_{e,max}} = \frac{1800 \text{ rpm} - 1662 \text{ rpm}}{1662 \text{ rpm}} \times 100\% = 8.3\% \quad (7)$$

$$\%err, n_{N_{e,max}} = \frac{2862 \text{ rpm} - 2600 \text{ rpm}}{2862 \text{ rpm}} \times 100\% = 9.15\% \quad (8)$$

Posteriormente, se realiza el mismo procedimiento para el motor a gasolina seleccionado. Inicialmente, se ingresan los siguientes datos en la interfaz gráfica de la herramienta computacional. Después de ingresados estos parámetros, y habiendo ejecutado los cálculos, se obtienen las curvas tentativas de par y potencia, como se aprecian a continuación, al igual que los porcentajes de error en par, potencia y los regímenes de giro.

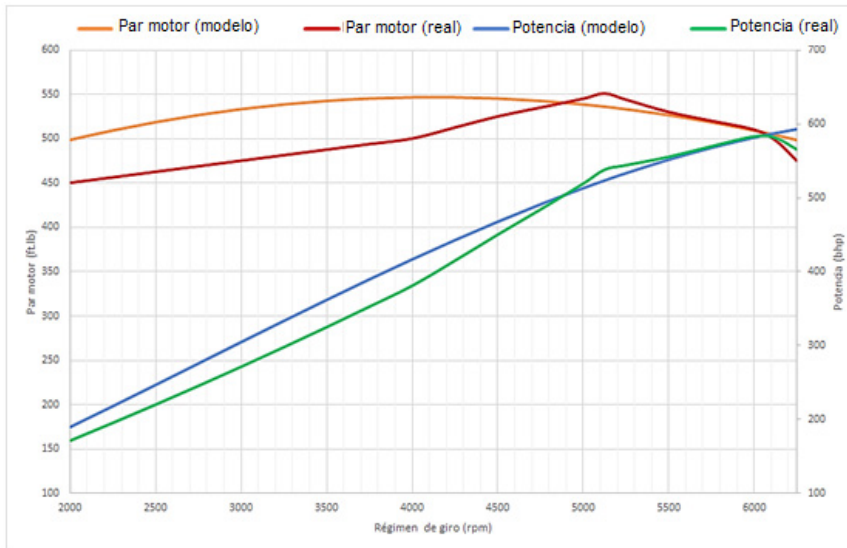


Fig. 8. Comparación entre curvas de par y potencia del modelo y reales del motor Dodge Viper SRT.

Se obtienen los márgenes de error utilizando los datos calculados en el aplicativo en conjunto con los datos experimentales:

$$\%err, T_{e,max} = \frac{771.19 \text{ N}\cdot\text{m} - 760 \text{ N}\cdot\text{m}}{771.19 \text{ N}\cdot\text{m}} \times 100\% = 1.5\% \quad (9)$$

$$\%err, N_{e,max} = \frac{472.53 \text{ kW} - 450 \text{ kW}}{472.53 \text{ kW}} \times 100\% = 4.8\% \quad (10)$$

$$\%err, n_{T_{e,max}} = \frac{5000 \text{ rpm} - 4125 \text{ rpm}}{4125 \text{ rpm}} \times 100\% = 21.2\% \quad (11)$$

$$\%err, n_{N_{e,max}} = \frac{7070 \text{ rpm} - 6000 \text{ rpm}}{7070 \text{ rpm}} \times 100\% = 15.1\% \quad (12)$$

Conclusiones

- La herramienta puede ser utilizada para diseñar motores alternativos con fines de investigación, teniendo en cuenta que entrega información relacionada con los parámetros efectivos del motor. Razón por la cual, de construirse el diseño propuesto, pueden existir diferencias con el ciclo real.

- Debido a que el modelo idealizado no contempla la determinación de pérdidas, se debe asumir la eficiencia mecánica y de combustión, porque generalmente estos datos no se encuentran con las especificaciones del motor por ser información confidencial (secreto industrial), y se debe tener en cuenta que se está validando un resultado real por medio de un ciclo ideal, aunque la tendencia del resultado ideal se mantenga en comparación a la del resultado real.
- El programa se considera una guía para diseñar otras herramientas computacionales aplicadas a otras áreas de la ingeniería, con enfoque académico y opción de complementarlos por ser proyectos *open-source*, y un punto de partida para desarrollar a largo plazo un programa de mayor complejidad con opción de análisis de las consideraciones importantes en el diseño y construcción de los motores alternativos. Esto se debe a que las herramientas computacionales en el campo de la ingeniería son una gran ayuda para complementar el proceso de aprendizaje e incentivar el campo investigativo en las diversas aplicaciones físicas y matemáticas.

Referencias

- [1] F. Payri y J. Desantes, *Motores de combustión interna alternativos*, Editorial Reverté, 2011.
- [2] DIESEL-RK is an engine simulation software. [Online]. Available: de <http://www.diesel-rk.bmstu.ru/Eng/>
- [3] Dynomation™ Main Page. [Online]. Available: <http://www.proracingsim.com/dynomationmainpage.htm>
- [4] W. W. Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [5] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, USA: McGraw-Gill, 1988.