



Estudio experimental de transeferncia de calor en motores de combustión interna usando la mezcla etanol-gasolina

Victor Daniel Jiménez Macedo, Carlos Rubio Maya, J. Jesús Pacheco Ibarra, Eduardo Cortéz Neri

Para citar este artículo: Jiménez Macedo V. D., Rubio Maya C., Pacheco Ibarra, J.J., Cortéz Neri E. 2022. Estudio experimental de transferencia de calor en motores de combustión interna usando la mezcla etanol-gasolina. Ciencia Nicolaita, número 83, 257-266. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.563>

View

[Ver material suplementario](#)

Online

[Publicado en línea, enero de 2022](#)

Send

[Envíe su artículo a esta revista](#)

Estudio experimental de transferencia de calor en motores de combustión interna usando la mezcla etanol-gasolina

Victor Daniel Jiménez Macedo *, Carlos Rubio Maya, J. Jesús Pacheco Ibarra, Eduardo Cortéz Neri

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 19 de julio de 2021

Aceptado: 15 de octubre de 2021

RESUMEN

En el presente estudio se realiza una estimación de la transferencia de calor en sistema de escape en un motor de combustión interna de cuatro tiempos, usando diferentes mezclas de etanol y gasolina como combustible, modificando la concentración de etanol del 2 al 8%. El objetivo del presente trabajo es cuantificar las diferencias porcentuales en las prestaciones del grupo electrógeno, primeramente, las variables de corriente eléctrica y voltaje, por parte del generador eléctrico, seguidamente, las variables termodinámicas como las temperaturas de escape, tanto del gas como de la pared y, en consecuencia, cuantificar su efecto en el calor transferido al exterior. Para determinar la transferencia de calor se han adoptado hipótesis unidimensionales. Los ensayos se realizan modificando el grado de carga del grupo bimotores. Se muestran resultados de las prestaciones del grupo electrógeno, de corriente y voltaje, bajo diferentes cargas. Seguidamente se exponen las temperaturas registradas bajo las diferentes concentraciones de combustible. Por otra parte, en los resultados obtenidos se tienen diferencias de hasta 2.74 y 0.81 % de corriente y voltaje respectivamente en todos los ensayos realizados. También se observaron diferencias inferiores a 4.91, 5.1 y 6.21% en las temperaturas del gas de escape, pared de escape externa y pared de escape interna, respectivamente en todos los ensayos y resultados obtenidos. Finalmente se presenta un estudio paramétrico de transferencia de calor, modificando el coeficiente de convección, donde se observan diferencias de hasta 4.83% en la tasa de calor con todas las concentraciones de combustible etanol-gasolina.

PALABRAS CLAVE: Generador eléctrico, etanol, motores térmicos.

ABSTRACT

In the present study, an estimate of the heat transfer in the exhaust system is carried out in a four-stroke internal combustion engine using different mixtures of ethanol and gasoline as fuel, modifying the ethanol concentration from 2 to 8%. The objective of this work is to quantify the percentage differences in the performance of the electric generator, firstly, the variables of electric current and voltage, by the electric generator, then, the thermodynamic variables such as the exhaust temperatures, both, of the gas and the wall, therefore, quantify its effect on the heat transferred to the outside. One-dimensional hypotheses have been adopted to determine heat transfer. The tests are carried out by modifying the degree of load of the generator unit. Results of the power unit performance, current and voltage, under different loads are shown. Moreover, the temperatures recorded under the different fuel concentrations are exposed. On the other hand, in the results obtained there are differences of up to 2.74 and 0.81% of current and voltage respectively in all the tests carried out. Also, differences of less than 4.91, 5.1 and 6.21% were observed in the temperatures of the exhaust gas, external exhaust wall and internal exhaust wall, respectively in all the tests and results obtained. Finally, a parametric study of heat transfer is presented, modifying the convection coefficient, where differences of up to 4.83% in the heat rate are observed with all concentrations of fuel ethanol-gasoline.

KEYWORDS: Power unit, ethanol, thermal engines.

1. Introducción

El uso del grupo motor de combustión interna y generador de electricidad tienen un amplio uso, primeramente, en lugares donde no está instalada la red eléctrica, en son zonas rurales alejadas generalmente de las principales ciudades. También el uso de estos sistemas son empleados en lugares donde es crítico contar con este recurso de energía eléctrica, como: (i) hospitales, (ii) centros especializados de informática y comunicaciones, (iii) lugares de refrigeración y, (iv) más recientemente, en coches eléctricos.

Como consecuencia entonces de todo ello, se establecen diferentes soluciones para el funcionamiento de este tipo de grupos bimotores de electro-combustión, entre el motor de combustión interna y generador eléctrico. Una investigación sobre el comportamiento de un motor de combustión interna de encendido por compresión de carga homogénea es presentada por Hasan (2021) donde usa concentraciones de etanol inferiores al 30%. Por otra parte, Prashant, G.K. (2016) presenta un trabajo que incluye mezclas de etanol, en un motor de encendido por compresión de cuatro tiempos, usando hasta un 40% de etanol en sus ensayos.

Por otra parte, el proceso de escape tiene lugar una vez concluida la carrera de combustión expansión. La apertura de la válvula de escape da lugar a la salida del gas que hay en el interior del cilindro. Las condiciones geométricas del colector de escape y las condiciones termodinámicas del gas son las que configuran el comportamiento termofluidodinámico del gas de escape, como lo indica Bauer (1997). De esta forma, la transferencia de calor juega un papel muy importante por su influencia en la entrada de aire fresco hacia al interior del motor de combustión y, por consiguiente, del comportamiento del motor como lo demuestra Reyes (1994). Finalmente, modelos unidimen-

sionales son ampliamente usados para estimar la tasa de calor transferido hacia el exterior del sistema de escape en motores de combustión interna de cuatro tiempos de gasolina como lo realiza Jiménez (2018). Por otra parte, los ensayos realizados por Ozsezen (2011) usando etanol de 5 y 10% en un motor de combustión interna de mediana cilindrada muestran incrementos en la potencia del motor del 2.2 y 1.1%, bajo condiciones de velocidad de 40, 60, 80 y 100 km/h. Además, concentraciones del 22% de etanol bajo relaciones de compresión de 10:1, 11:1 y 12:1 mejora el desempeño del motor en todas las condiciones de régimen de giro investigadas (Costa, 2011). También un estudio paramétrico modificando la concentración de etanol y la relación de compresión a plena carga y reducido avance en la combustión proporciona un incremento en el par motor (Yücesu, 2006). Asimismo, Eyidogan, M. (2010) presenta un estudio incluyendo el 5 y 10% de etanol en el combustible que suministra a un motor de combustión interna de cuatro tiempos, con una velocidad de 80 y 100 km/hr, donde se observó un incremento en el calor liberado bajo las concentraciones de etanol experimentadas. Igualmente, un estudio realizado en un motor de combustión interna de inyección directa de encendido por chispa, modificando el 10 y 20% de etanol en el suministro de combustible, se observó un incremento en la masa de combustible quemado bajo diferentes concentraciones de gases recirculados en la fase inicial de combustión del 0 al 10% (Zhang, 2014).

El presente trabajo tiene por objetivo caracterizar el desempeño del grupo electrógeno y la transferencia de calor en el escape. Para cumplir este objetivo, primeramente, se describe un apartado experimental y el sistema motor de combustión y generador eléctrico. Se emplea un motor de cuatro tiempos de encendido por chispa de pequeña cilindrada para la presente investigación. Las principales mediciones son

las temperaturas en la línea de escape, tanto del gas, como de la pared externa. Una motivación del presente escrito es conocer de forma experimental el efecto que tienen las concentraciones de etanol en la termodinámica del motor de combustión interna, en el flujo caliente del sistema de escape bajo las condiciones controladas que se han experimentado. De esta forma, la contribución de este trabajo es caracterizar el funcionamiento del grupo electrógeno bajo diferentes concentraciones de etanol.

2. Apartado experimental

En la presente sección se describe los recursos experimentales empleados para la obtención de las mediciones realizadas en los ensayos. Las medidas de las temperaturas en el interior del tubo de escape y la pared externa, que permite calcular la transferencia de calor en un sistema de escape de un motor de cuatro tiempos, de encendido por chispa modificando concentraciones del combustible etanol gasolina. La obtención del calor transferido es información que sirve para un balance de energía, entre lo que se suministra por la mezcla aire-combustible y el calor transferido por los diferentes sistemas donde se expulsa calor hacia el exterior del motor. No obstante, este balance de energía excede los alcances del presente estudio.

En esta figura 1 se muestran el grupo electrógeno puesto a punto para realizar ensayos

modificando diferentes concentraciones de etanol.

El motor de combustión interna es atmosférico monocilíndrico de refrigeración por aire. Se instrumenta con termopares a la mitad de la longitud total del tubo de escape para medir la temperatura del gas en el interior del sistema de escape. Se han empleado termopares tipo K. También a la mitad de la longitud total del tubo de escape se ha registrado la temperatura de la pared externa. Para registrar las mediciones se ha usado un sistema de adquisición de datos.

También se han usado resistencias eléctricas para consumir energía del grupo electrógeno, esto genera diferentes condiciones de operación del grupo. La potencia consumida por las resistencias son 1000, 2000 y 3000 W. Para la medición de la corriente eléctrica y el voltaje se ha usado un multímetro. Por otra parte, en las mezclas del combustible etanol-gasolina se ha usado un sistema de medida de combustible con la finalidad de proveer de forma cuantitativa el suministro másico de combustible entrante al motor. Las concentraciones de etanol suministradas al motor de combustión interna son del 0, 2, 4, 6 y 8% de etanol.

3. Modelado de transferencia de calor

Una vez obtenidas las temperaturas del gas y la pared externa, modificando la poten-



FIGURA 1. Grupo electrógeno usado en el presente estudio.

TABLA 1 Configuración del grupo electrógeno.

Característica del MCI y Generador de electricidad	
Cilindrada del MCI	420 cc
Número de cilindros	Monocilíndrico
Suministro del combustible	Carburador
Régimen de giro	3600 rpm
Frecuencia	60 Hz

cia de salida del grupo electrógeno y la concentración del combustible suministrado de etanol-gasolina, como se indicó en la sección anterior, ahora, en la presente sección, se presenta la metodología seguida para determinar la temperatura de pared interna y la tasa de transferencia de calor. De esta forma, para calcular la temperatura de pared interna, primeramente, fue obtenida de una relación para conocer la temperatura entre la pared interna y la pared externa. Esta relación se obtiene a partir de la ecuación diferencial unidimensional de transferencia de calor, que es:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad \text{ec.(1)}$$

La ec. (1) es la ecuación diferencial usada para coordenadas cilíndricas, que es apropiada para la geometría del escape. Donde es el radio del tubo de escape y la temperatura. La ec. (1) fue resuelta usando una condición de frontera de convección, que existe entre el gas y la pared interna del sistema de escape. De esta forma, se obtiene una ecuación que determina la temperatura entre la pared interna y la pared externa del tubo de escape que es función del radio del tubo de escape y que es:

$$T(r) = T_{t,ext} + C_1 \ln \left(\frac{r}{r_{t,ext}} \right) \quad \text{ec.(2)}$$

Donde $T_{t,ext}$ es la temperatura del tubo en la pared externa y $r_{t,ext}$ es el radio del tubo considerando el centro de la sección transversal del

tubo hasta la pared externa del mismo. También, en esta misma ecuación, C_1 , Es una constante obtenida aplicando la condición de frontera de convección, y contiene información de las temperaturas medidas con las diferentes condiciones de operación del motor, geometría de la sección transversal del tubo, la conductividad térmica del motor y el coeficiente de convección. De esta forma, al establecer la solución de la ecuación del calor transferido por conducción, obtenemos la pérdida de calor de los gases de escape a través del sistema de escape para esa determinada posición de los termopares, esta solución es:

$$\dot{Q} = -K A \frac{dT}{dr} \quad \text{ec. (3)}$$

La variable \dot{Q} es la tasa de conducción de calor a través del tubo, K es una constante de conductividad térmica del material, A es una constante que representa el área de la sección transversal.

4. Resultados

Los resultados de las prestaciones se muestran en la presente sección. Se revisará de forma individual el comportamiento del generador eléctrico y del motor de combustión interna.

4.1. Generador eléctrico

El funcionamiento del generador eléctrico es objeto de la presente subsección. En la figura 2 se muestra la corriente eléctrica que entrega el generador eléctrico. En esta figura 2 se observan resultados del amperaje registrado con el multímetro bajo las diferentes cargas a las que

fue sometido el generador eléctrico. Los resultados muestran un incremento en el consumo de corriente eléctrica a medida que se va incrementando la carga con las resistencias eléctricas y de la potencia que se es consumida. Estos resultados se han registrado modificando la concentración porcentual de etanol en la mezcla del combustible etanol-gasolina en el motor térmico, con variaciones de etanol de 0, 2, 4, 6, 8%; donde se pueden observar diferencias de hasta 2.74, 1.25, y 2.03% respectivamente, a 1000, 2000 y 3000 W.

Estas diferencias, entre los valores medidos de intensidad de corriente, modificando la carga eléctrica, existen por el par aplicado al eje del rotor del generador eléctrico. Así pues, como se muestra en la figura 2, este par aplicado es directamente proporcional a la potencia eléctrica que entrega el generador de corriente alterna.

Por otra parte, en la Figura 3 al generador eléctrico, donde los resultados de voltaje muestran rangos mínimos y máximos de 116.6 a 123.2 V. Esto se debe principalmente a que a bajas cargas el generador provee la máxima tensión por estar sobre diseñado el generador a bajos consumos de energía.

No obstante, conforme se incrementa la demanda de energía eléctrica, el generador eléctrico va reduciendo la capacidad de tensión eléctrica que es capaz de suministrar. Pero es importante señalar que los valores de voltajes registrados están en un rango de voltaje válido para consumos eléctricos típicos de una casa de bajo a medio consumo de energía eléctrica, que cuenta con suministro eléctrico de 110 V. De esta forma, siguiendo la tendencia que se muestra en esta figura 3, al incrementar más la carga, la tensión será el valor que entrega la red eléctrica, donde evidentemente, esta carga es el límite de diseño del generador eléctrico. También los valores que se muestran en esta misma figura 3 son considerando las mismas diferentes mezclas de combustible etanol-gas-

olina; donde se muestran diferencias inferiores al 0.81, 0.24 y 0.17% respectivamente a 1000, 2000, 3000 W. en cada específica condición de carga y del 5.66% entre los valores mínimos y máximo registrados en todos los ensayos.

4.2. Motor de combustión interna

Por otra parte, se muestran los resultados del desempeño que tiene el motor de combustión interna, que es el que proporciona la energía mecánica al generador eléctrico para que se disponga de energía eléctrica. De esta forma, en la figura 4, se muestran los resultados registrados de la instrumentación del sistema de escape. En esta figura 4 se muestran la temperatura en el interior del sistema de escape, considerando diferentes grados de carga tanto del generador eléctrico como del motor de combustión interna, bajo las mismas diferentes concentraciones del combustible etanol-gasolina de la figura 2 y la figura 3. Así pues, en la figura 4 se observan los resultados de temperatura en su forma adimensional, para contrastar de forma comparativa todas las mediciones, donde se ha usado una condición que ha sido registrada en el grupo electrógeno como de referencia. Las temperaturas se tienen diferencias inferiores al 4.71, 4.91 y 2.62% respectivamente a 1000, 2000, 3000 W. En estos resultados, al modificar las diferentes cargas, se pueden observar bajas variaciones en las temperaturas; principalmente por que el régimen de giro es constante, como se indica en la tabla 1. También las temperaturas de la pared externa del escape se muestran en la figura 5.

En esta figura 5, se muestra las mediciones hechas en la pared externa del sistema de escape, considerando las diferentes condiciones de carga que se han presentado en la figura 4. Se muestran en su forma adimensional, para ello se ha empleado una condición medida.

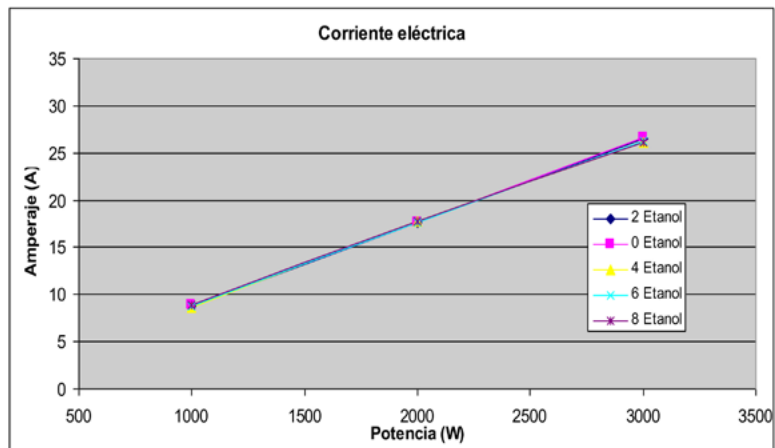


FIGURA 2. Corriente eléctrica suministrada por el generador eléctrico.

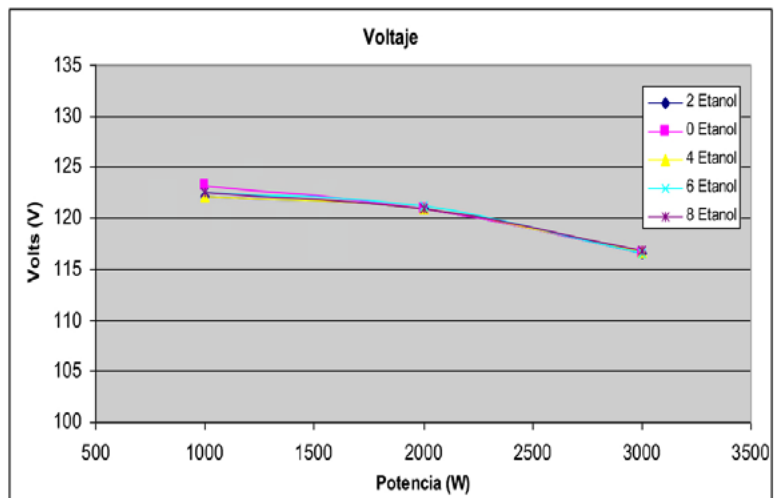


FIGURA 3. Tensión suministrada por el generador eléctrico.

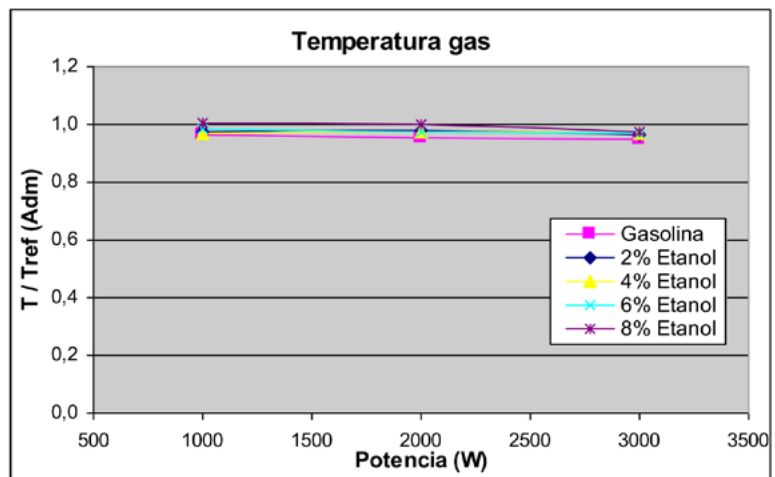


FIGURA 4. Resultados de la temperatura del gas de escape.

Estos resultados muestran diferencias inferiores a 4.83, 5.1 y 3.6% respectivamente a 1000, 2000, 3000 W. Por otra parte, adoptando hipótesis unidimensionales con la ecuación (2), fue posible determinar la temperatura de pared interna, estos resultados se muestran en la figura 6.

Los resultados de temperatura de pared interna muestran diferencias máximas de 4.83, 6.21 y 3.55% respectivamente a 1000, 2000, 3000 W. Ahora los valores obtenidos para determinar la tasa de calor, modificando el coeficiente de convección se muestran en la figura 7.

En esta figura se muestra cómo el flujo de calor se incrementa al aumentar el coeficiente de convección, que es razonable, por el efecto que imprime el coeficiente en la transferencia de calor. Estos resultados se muestran en su forma adimensional, tomando en cuenta una condición de referencia que considera un promedio de los coeficientes de película del estudio paramétrico. También en la figura 8 se muestran estos mismos resultados, pero considerando una carga de 2000 W en el generador eléctrico. Están en su forma adimensional con la misma condición de referencia de la figura 7.

En esta figura 8, al igual que en la figura 7, se muestra que el flujo de calor se incrementa al aumentar el coeficiente de convección. Finalmente, en la figura 9, se muestran los mismos resultados de las figuras 7 y 8, pero con una carga de 3000 W.

En estas figuras se muestran diferencias de hasta 4.83, 4.81 y 2.75% respectivamente, a una carga de 1000, 2000, 3000 W, que son con un coeficiente de convección de $250 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Conclusiones

En la presente investigación se ha realizado un estudio de transferencia de calor en el escape en un motor de cuatro tiempos que for-

ma parte de un grupo electrógeno.

Primeramente, se han mostrado resultados de corriente eléctrica y voltaje del generador eléctrico para 1000, 2000, 3000 W. En los resultados obtenidos se tienen diferencias de hasta 2.74 y 0.81% de corriente y voltaje respectivamente en todos los ensayos realizados. Por otra parte, en cuanto al motor de combustión interna, se ha medido la temperatura del gas y de la pared externa bajo diferentes concentraciones de etanol que varían del 0 al 8 %. También se ha resuelto la ecuación diferencial unidimensional de transferencia de calor para, primeramente, obtener una ecuación que determina el perfil de temperatura en función del radio del tubo de escape y, seguidamente, para obtener la tasa de calor que se expulsa al exterior. En las temperaturas se observaron diferencias inferiores a 4.91, 5.1 y 6.21% en las temperaturas del gas de escape, pared de escape externa y pared de escape interna, respectivamente en todos los ensayos y resultados obtenidos. También, se han obtenido diferencias de hasta 4.83% en la tasa de calor con todas las concentraciones de combustible investigadas. Finalmente, estos resultados indican que bajo concentraciones de etanol que varían del 2 al 8 %, en un amplio rango de operación del grupo electrógeno, no hay cambios significativos en las prestaciones del generador eléctrico y motor de combustión interna, de esta forma, con este estudio se demuestra que es posible usar el etanol sin que afecte el comportamiento de ambos motores, principalmente, con las condiciones de combustible experimentadas.

Agradecimientos

Se agradece al Programa para el Desarrollo Profesional Docente, para el Tipo Superior, PRODEP, por el apoyo recibido, así mismo se agradece de igual forma a la Coordinación de

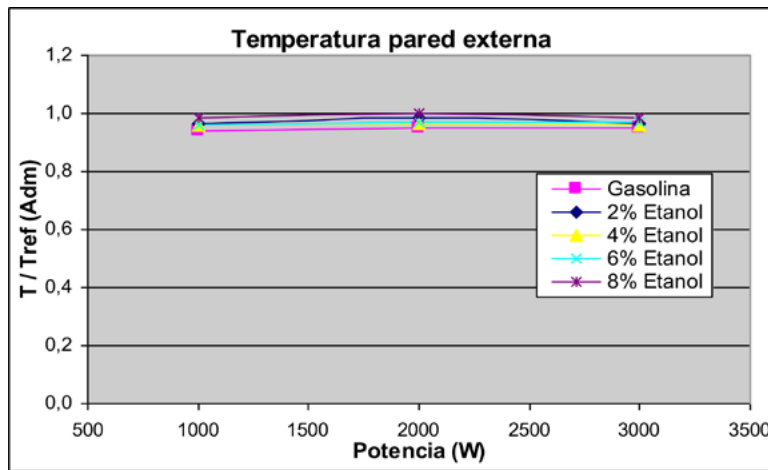


FIGURA 5. Resultados de la temperatura de la pared externa de escape.

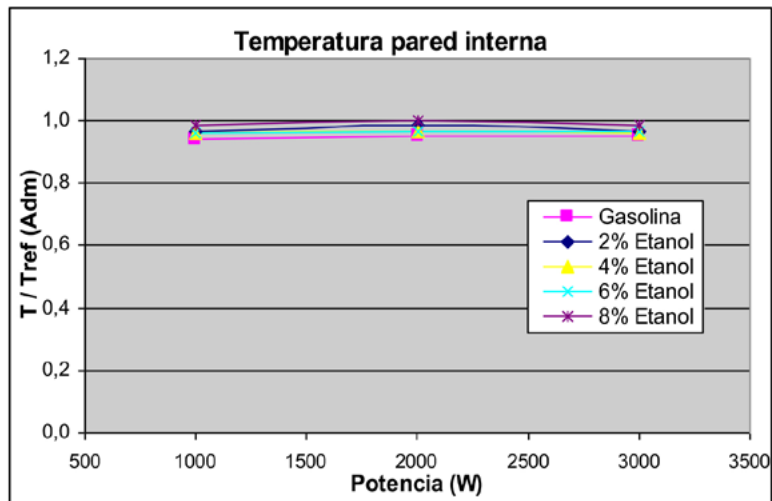


FIGURA 6. Temperatura de la pared interna de escape.

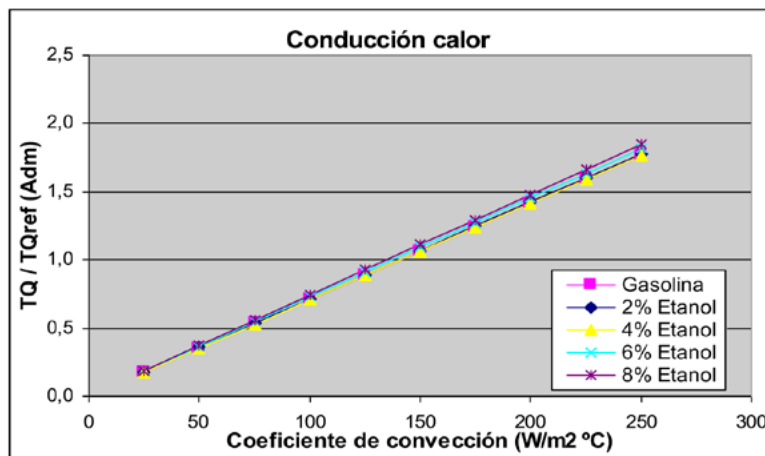


FIGURA 7. Estudio paramétrico de transferencia calor, modificando el coeficiente de convección para una carga de 1000 W

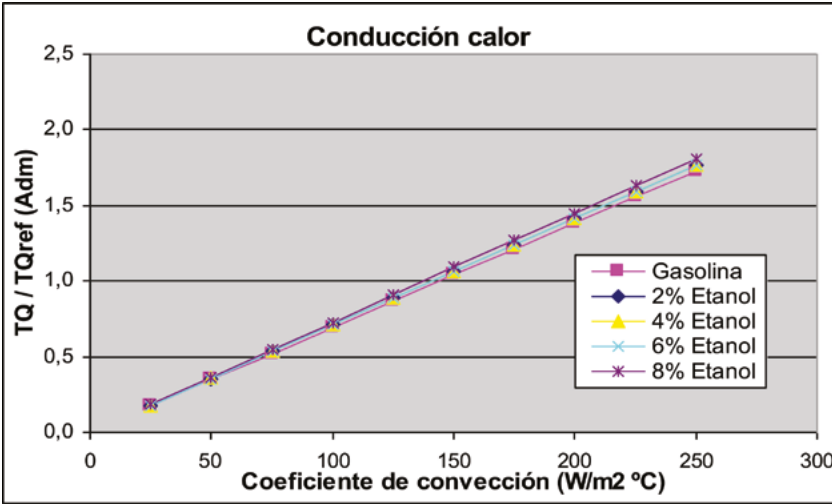


FIGURA 8. Estudio paramétrico de transferencia calor, modificando el coeficiente de convección para una carga de 2000 W.

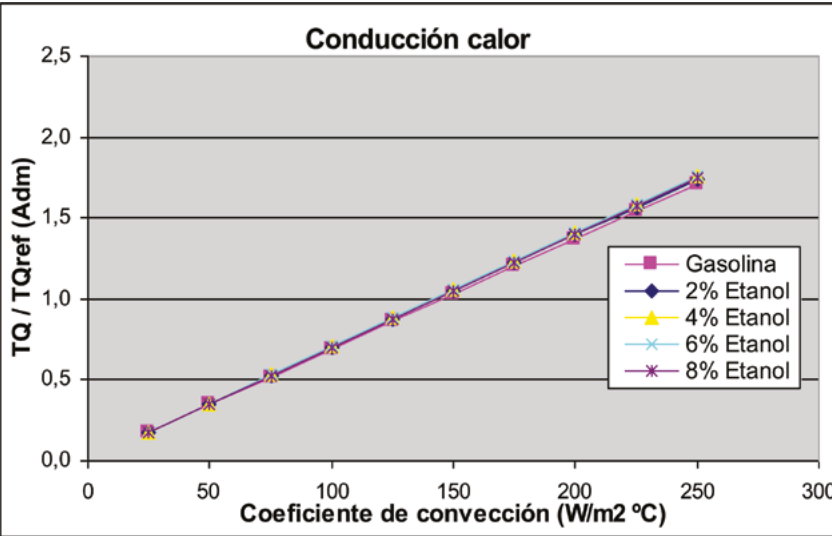


FIGURA 9. Estudio paramétrico de transferencia calor, modificando el coeficiente de convección para una carga de 3000 W

de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo CIC-UMSNH.

Referencias

- BAUER ET AL., 1997 HEAT TRANSFER AND MIXTURE VAPORIZATION IN INTAKE PORT OF SPARK-IGNITION ENGINE. SAE 972983. *M.I.T. SLOAN AUTOMOTIVE LAB*.
- COSTA, R., SODRÉ, J., 2011. COMPRESSION RATIO EFFECTS ON AN ETHANOL/GASOLINE FUELLED ENGINE PERFORMANCE. *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, 31, 278-283. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2010.09.007](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.09.007).
- EYIDOGAN, M., ÖZSEZEN, A.N., CANAKCI, M., TURKCAN, A., 2010. IMPACT OF ALCOHOL-GASOLINE FUEL BLENDS ON THE PERFORMANCE AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF AN SI ENGINE.
- HASAN, M.M., RAHMAN, M.M. AND RASUL, M. G., 2021. THE THERMAL AND AUTO-IGNITION PERFORMANCE OF A HOMOGENEOUS CHARGE COMPRESSION IGNITION ENGINE FUELLED WITH DIETHYL ETHER AND ETHANOL BLENDS, *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, Vol. 190.
- JIMÉNEZ, V. D., MENDOZA, C., SOLORIO, G., CEJA, L.E., GUERRERO, R., 2018. TRANSFERENCIA DE CALOR LOCAL EN UN SISTEMA DE ESCAPE EN UN MOTOR DE 4.1 L DE ENCENDIDO POR CHISPA. *ACADEMIA JOURNALS*, Vol. 10, No. 3, ISSN 1946-5351, MORELIA, MÉXICO.
- JIMÉNEZ MACEDO ET AL., 2019. CONSTRUCCIÓN, OPTIMIZACIÓN Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO. *CECTI*, MORELIA, MÉXICO.
- MOFIJUR, M., RASUL, M. G., HYDE, J., AZAD, A. K., MAMAT, R., & BHUIYA, M. M. K., 2016. ROLE OF BIOFUEL AND THEIR BINARY (DIESEL-BIODIESEL) AND TERNARY (ETHANOL-BIODIESEL-DIESEL) BLENDS ON INTERNAL COMBUSTION ENGINES EMISSION REDUCTION. *RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, 53, 265-278.
- NATKIN RJ, TANG X, WHIPPLE KM, KABAT DM., 2002. STOCKHAUSEN WF. FORD HYDROGEN ENGINE LABORATORY TESTING FACILITY. *SAE TECHNICAL PAPER NO. 2002-01-0241*.
- ÖZSEZEN, A., CANAKCI, M., 2011. PERFORMANCE AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF ALCOHOL-GASOLINE BLENDS AT WIDE-OPEN THROTTLE. *ENERGY*, 36, 2747-2752. DOI:10.1016/J.ENERGY.2011.02.014
- PRASHANT, G.K., LATA, D.B. AND JOSHI, P.C., 2016. INVESTIGATIONS ON THE EFFECT OF ETHANOL BLEND ON THE COMBUSTION PARAMETERS OF DUAL FUEL DIESEL ENGINE. *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, Vol. 96.
- RAKOPOULOS CONSTANTINE ET GIAKOUMIS EVANGELOS., 2009. *DIESEL ENGINE TRANSIENT OPERATION*, SPRINGER-VERLAG LONDON LIMITED, ISBN 978-1-84882-374-7, DOI 10.1007/978-1-84882-375-4.
- REYES, MIGUEL, 1994. MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA COLECTORES DE ESCAPE DE MOTORES ALTERNATIVOS. *TESIS DOCTORAL. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA*.
- YÜCESU, H., TOPGÜL, T., CINAR, C., OKUR, M., 2006. EFFECT OF ETHANOL-GASOLINE BLENDS ON ENGINE PERFORMANCE AND EXHAUST EMISSIONS IN DIFFERENT COMPRESSION RATIOS. *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, 26, 2272-2278. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2006.03.006](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.03.006).
- ZHANG, Z., WANG, T., JIA, M., WEI, Q., MENG, X., SHU, G., 2014. COMBUSTION AND PARTICLE NUMBER EMISSIONS OF A DIRECT INJECTION SPARK IGNITION ENGINE OPERATING ON ETHANOL/GASOLINE AND N-BUTANOL/GASOLINE BLENDS WITH EXHAUST GAS RECIRCULATION. *FUEL*, 130, 177-188. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.FUEL.2014.04.052](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.052)