



Emisiones y temperaturas de los gases de escape de un motor durante el arranque en frío aplicando dos tipos de combustibles

Emissions and temperatures of the exhaust gasses of an engine during the cold start applying two types of fuels

Emissões e temperaturas dos gases de escape de um motor durante o arranque a frio, utilizando dois tipos de combustíveis

Jorge Luis Lema-Loja¹

jorgel.leva@ute.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-1515-4526>

Correspondencia: jorgel.leva@ute.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de agosto de 2022 * **Aceptado:** 28 de septiembre de 2022 * **Publicado:** 01 de octubre de 2022

- I. Magíster en Sistemas Automotrices, Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias, Universidad UTE, Quito, Ecuador.

Resumen

La contaminación ambiental por parte del sector automotriz, es un grave problema de índole mundial. Existen etapas durante el funcionamiento de los motores de combustión interna que hacen inevitables la formación de mezclas estequiométricas. Una de estas etapas es el arranque en frío, en la cual se libera una mayor cantidad de gases contaminantes y cuya reducción es restringida debido a la necesidad de alcanzar la temperatura normal de trabajo del motor en el menor tiempo posible. En este estudio se comparó las emisiones de HC, CO, CO₂, O₂ y temperaturas de los gases de escape en un vehículo aplicando combustibles ecuatorianos RON 92 y RON 87, durante el arranque en frío. Para la adquisición de los datos de las temperaturas, se utilizó un sensor DHT22 enlazado a un módulo ESP32. Para la obtención de los datos de emisiones se efectuó por medio del analizador de gases Kane Autoplus. Los resultados mostraron que el combustible RON 87 genera mayores temperaturas de los gases de escape y menor cantidad de emisión de HC, CO, CO₂, con excepción del O₂. Es decir, el combustible de menor RON emite menores emisiones de gases contaminantes. Adicionalmente, se determinó una fuerte correlación entre los gases HC y O₂ con las temperaturas de los gases de escape para ambos combustibles. Por otro lado, las correlaciones de los gases CO₂ y CO con las temperaturas son moderadas, con la excepción del CO para el combustible RON 87, por lo cual no tiene relación con la temperatura.

Palabras clave: Arranque en frío; Combustibles; Emisiones; Gases de escape; RON; Temperaturas.

Abstract

Environmental pollution by the automotive sector is a serious global problem. There are stages during the operation of internal combustion engines that make the formation of stoichiometric mixtures unavoidable. One of these stages is the cold start, in which a greater quantity of polluting gases is released and whose reduction is restricted due to the need to reach the normal working temperature of the engine in the shortest possible time. In this study, the emissions of HC, CO, CO₂, O₂ and exhaust gas temperatures were compared in a vehicle applying Ecuadorian fuels RON 92 and RON 87, during cold start. For the acquisition of temperature data, a DHT22 sensor linked to an ESP32 module was used. Emission data was obtained using the Kane

Autoplus gas analyzer. The results showed that the RON 87 fuel generates higher exhaust gas temperatures and lower amounts of HC, CO, CO₂ emissions, with the exception of O₂. That is, the lower RON fuel emits lower polluting gas emissions. Additionally, a strong correlation between HC and O₂ gases with exhaust gas temperatures was determined for both fuels. On the other hand, the correlations of CO₂ and CO gases with temperatures are moderate, with the exception of CO for the RON 87 fuel, for which it has no relationship with temperature.

Keywords: Cold start; fuels; emissions; Exhaust gases; RON; temperatures.

Resumo

A poluição ambiental pelo setor automotivo é um grave problema global. Existem etapas durante o funcionamento dos motores de combustão interna que tornam inevitável a formação de misturas estequiométricas. Uma dessas etapas é a partida a frio, na qual é liberada maior quantidade de gases poluentes e cuja redução é restrita devido à necessidade de atingir a temperatura normal de trabalho do motor no menor tempo possível. Neste estudo, as emissões de HC, CO, CO₂, O₂ e as temperaturas dos gases de escape foram comparadas em um veículo que utiliza os combustíveis equatorianos RON 92 e RON 87, durante a partida a frio. Para a aquisição dos dados de temperatura foi utilizado um sensor DHT22 acoplado a um módulo ESP32. Os dados de emissão foram obtidos usando o analisador de gases Kane Autoplus. Os resultados mostraram que o combustível RON 87 gera maiores temperaturas dos gases de escape e menores quantidades de emissões de HC, CO, CO₂, com exceção do O₂. Ou seja, o combustível RON mais baixo emite menos emissões de gases poluentes. Além disso, uma forte correlação entre os gases HC e O₂ com as temperaturas dos gases de escape foi determinada para ambos os combustíveis. Por outro lado, as correlações dos gases CO₂ e CO com as temperaturas são moderadas, com exceção do CO para o combustível RON 87, para o qual não tem relação com a temperatura.

Palavras-chave: Partida a frio; combustíveis; emissões; Gases de escape; RON; temperaturas.

Introducción

En el contexto actual, la contaminación al medio ambiente es uno de los problemas más desafiantes para el ser humano (Zarandi, Shahsavani, Nasiri, & Pradhan, 2021). La contaminación en el entorno natural produce afectaciones a nivel respiratorio y cardiovascular,

pudiendo evolucionar en graves enfermedades a nivel cancerígeno (Brancato et al., 2018) (Lopez-Arboleda, Sarmiento, & Cardenas, 2021). La contaminación es la modificación negativa del medio ambiente causada por agentes físicos, biológicos o químicos (Meneses, Turto, & Molina, 2004). Con respecto al agente químico, el desequilibrio ambiental es afectado por la acumulación de gases de efecto invernadero y compuestos orgánicos nocivos, en la atmósfera terrestre. Dentro de los principales compuestos químicos nocivos se tienen a los monóxidos de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) hidrocarburos no combustionados (HC), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀); mientras que el dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas de efecto invernadero. El CO es un gas incoloro y puede provocar la muerte debido a su presencia en la sangre, dando como resultado elevados niveles de carboxihemoglobina. El CO se genera por combustiones deficientes de materiales orgánicos. Los HC son compuestos conformados por carbono e hidrógeno, que no han sido combustionados por las malas relaciones de mezcla entre el aire y el combustible. Incluso, los HC pueden ser el resultado de las evaporaciones de los combustibles por una incorrecta distribución y almacenaje de los mismos. Uno de los hidrocarburos más relevantes es el benceno (C₆H₆), el cual puede provocar irritaciones en los ojos y cáncer en las personas (Flores, Byron, & Romero, 2016). Al igual que el CO y HC, los PM₁₀ y PM_{2,5} son el resultado de combustiones deficientes que también pueden causar graves problemas a nivel respiratorio (Gaviria G, Benavides C, & Tangarife, 2011). Los NOx, a diferencia de los HC, es un compuesto inorgánico conformado por la combinación del oxígeno y el nitrógeno. Los NOx consisten principalmente de óxido nítrico (NO) y de dióxido de nitrógeno (NO₂), los cuales son formados por las altas temperaturas de la combustión y son causantes de la formación de deposiciones ácidas (Flores, Byron, & Romero, 2016). Las deposiciones ácidas, mejor conocidas en la sociedad como lluvia ácida, es producida por la reacción de los NOx con el agua del medio ambiente, generando ácido nítrico (HNO₃) y ácido sulfúrico (H₂SO₄). La lluvia ácida degrada al ecosistema mediante un aumento en el nivel de acidez de los ríos y mares, provocando daños a la fauna marina, por ejemplo. El CO₂ por su parte, no es un gas tóxico para el ser humano, sin embargo, es causante del calentamiento global. De hecho, en la combustión estequiométrica de la gasolina cuya relación de aire y combustible es de 14,7 a 1, los productos generados son CO₂ y agua, por lo que es inevitable la emisión de este gas en cualquier proporción de mezcla entre el combustible y comburente. Para el caso del SO₂, si bien se produce por la quema de combustibles, también es generada por procesos anaerobios y

erupción de volcanes (Flores, Byron, & Romero, 2016). Entre las fuentes que generan los compuestos y gases antes mencionados se encuentran los hogares, edificios, restaurantes, empresas industriales y el transporte terrestre, siendo este último el responsable de la mayor cantidad de las emisiones de dióxido de carbono (Santos, 2017) y la principal fuente de contaminación de manera global (Pospisil & Jicha, 2017) (Faulin, Grasman, Juan, & Hirsch, 2019). Si bien los vehículos se someten a ciclos de conducción en bancos dinamométricos, con la finalidad de que puedan cumplir con estrictos estándares de emisiones (Saliba et al., 2017), estas pruebas no simulan la situación del vehículo bajo las condiciones reales de funcionamiento tales como la congestión vehicular, condiciones climáticas, estilo de conducción, aire acondicionado, topografía, altitud y arranque en frío (Ramos, Muñoz, Andrés, & Armas, 2018). Con respecto a esta última condición, el arranque en frío es una etapa complicada para el motor, debido a la poca lubricación existente entre los elementos constitutivos del motor y a la alta viscosidad del lubricante, lo que genera una disminución de la eficiencia del motor. Durante esta etapa, la unidad de control electrónica del sistema de inyección (ECU), no considera la señal de tensión del sensor de oxígeno para la determinación de la inyección de combustible en el motor, y con ello, no garantiza una mezcla estequiométrica. Este aspecto es muy importante debido a que inicialmente el motor se encuentra a una relativa baja temperatura, por lo que es imprescindible tener una combustión incompleta para alcanzar la temperatura normal de funcionamiento (alrededor de los 90 °C) en el tiempo más corto posible. Además, durante esta etapa, existe una baja eficiencia del catalizador, pues para su óptimo funcionamiento, es necesaria de una alta temperatura de trabajo y que la relación aire/combustible sea cercana a la estequiométrica, lo que implica la inevitabilidad de una mayor concentración de emisiones (Bielaczyc, Szczotka, & Woodburn, 2011). De hecho, el funcionamiento del motor a bajas temperaturas de alrededor de -7 °C, puede generar un aumento de las emisiones de CO y HC en 2,3 a 11,3 veces durante el ciclo de conducción urbana, con respecto al funcionamiento del motor a temperatura normal de trabajo (Dardiotis, Martini, Marotta, & Manfredi, 2013). Un aspecto que puede incidir aún más en los niveles de emisión de gases de escape, es el índice de octano de los combustibles (RON), cuyo valor indica la resistencia a la detonación del combustible durante el tiempo de compresión, por lo que la potencia del motor es mejor a medida que aumenta el RON del combustible en uso. En Ecuador, el parque automotor liviano del país utiliza gasolina Extra (RON87) y Súper (RON92), en su gran mayoría. Es pertinente recalcar que durante los primeros minutos del funcionamiento

del motor, la ECU no toma en cuenta a la señal del sensor de oxígeno para el control de la inyección de combustible, por lo que las mezclas estequiométricas son limitadas. La acción de no considerar la señal de voltaje del sensor de oxígeno por parte de la ECU, se denomina estado del control de inyección en lazo abierto. El lazo cerrado por otra parte, se genera en velocidades crucero y consiste en la consideración de la señal de voltaje, por lo que existe retroalimentación de información hacia la ECU. Por lo tanto, puede existir un mejor control de la inyección de combustible, generando mezclas estequiométricas y reducción de las emisiones contaminantes. Si bien la duración del arranque en frío es de unos pocos minutos, con lo cual aparentemente la contaminación no sería considerable, el problema real radica por la gran cantidad de vehículos que existen en las ciudades y que necesariamente deberán pasar por esta etapa, previo al desplazamiento del vehículo por las rutas de las ciudades. En general, la contaminación ambiental por arranque en frío no depende en gran medida del tiempo de duración de esta etapa, sino, por el volumen de los vehículos en las ciudades.

Actualmente, existen escasos estudios que involucren tanto a la etapa de arranque en frío del motor de combustión interna como a las emisiones de gases de escape, en función del tipo de combustible. Algunas de las investigaciones más cercanas a este tema de investigación se detallan a continuación. En Hu et al. (2006) se mezcló gasolina con un porcentaje menor al 30% de metanol, logrando una reducción de HC en un 40% a 5°C y un 30% a 15°C, mientras que la reducción de CO es de alrededor del 70% cuando se mezcla con un 30% de metanol. En Clairotte et al. (2013) concluye que las emisiones no reguladas como el amoníaco, es menor para mezclas de gasolina con etanol, en una prueba con banco dinamométrico. En la investigación realizada por Martins et al. (2014) utiliza gasolina con 22% de etanol (E22), Gas Natural Comprimido (GNC) y etanol hidratado a un vehículo sometido al ciclo FTP 75, concluyendo con una menor emisión de HC para E22, mientras existió una menor emisión de NOx para GNC. Por otra parte, existen estudios que no se enfocan en el arranque en frío pero comparan las emisiones de gases contaminantes mediante la utilización de combustibles con distinto RON y que también pueden ser considerados para la discusión de este trabajo. Estos estudios se detallan a continuación. Tipanluisa et al. (2017) compara las emisiones para RON92 y RON87 a 2500 rpm, cuyos resultados indicaron que existió un ligero aumento de HC y CO₂ para RON92. En cambio, las emisiones de CO y oxígeno (O₂) para RON87 son ligeramente superiores. También se efectuaron mediciones a 700 rpm, donde CO y O₂ son superiores en RON92, el CO₂ se mantiene constante

en ambos combustibles y el HC es ligeramente superior en RON87. Sayin et al. (2005), aplicó un combustible RON95 a un vehículo que solamente requería RON91, lo cual permitió determinar que RON91 generó 5,7% de CO y 3,4% de HC menos que RON95. Mohamad y Geok (2014), compararon las emisiones de gases contaminantes para combustibles RON95 y RON97. Los resultados indicaron que RON97 produjo emisiones más bajas para HC, CO y CO₂ en un promedio de 20,3%; 36,9% y 7,9% respectivamente, pero generó un 7,7% más de emisiones de NO_x. Binjuwair et al. (2015), estudiaron las emisiones de gases contaminantes que generan los combustibles RON91 y RON95. Los resultados mostraron que las emisiones de CO y NO_x fueron más altas para RON91. Con base a los estudios mencionados, se visualiza una carencia de estudios en el cual se relacione a las emisiones de gases de escape durante el arranque en frío con combustibles puros (sin mezclas con otros alcoholes). Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo comparar las emisiones y temperaturas de los gases de escape mediante la aplicación de los combustibles ecuatorianos RON92 y RON87, utilizando equipos y materiales de fácil acceso para la medición de los parámetros de estudio, y así mismo plantea recurrir a plataformas tecnológicas actuales de información para la registro y almacenamiento de datos. Otro aspecto importante que aborda la investigación, y que es de nulo conocimiento, consiste en la determinación de las correlaciones que existen entre las temperaturas de los gases de escape y los valores de emisiones de HC, CO, CO₂ y O₂. Esto permitirá calcular las emisiones de gases de escape en función del tiempo y de la temperatura mediante la aplicación de ecuaciones polinómicas. Con los resultados de esta investigación, se espera que el combustible de mayor RON emita mayores emisiones de gases contaminantes, al igual que la mayoría de las investigaciones previas existentes a temperatura normal de funcionamiento del motor.

Metodología

La adquisición de datos se realizó en un vehículo liviano con motor térmico alternativo de 4 tiempos a gasolina, cuya ficha técnica se muestra en la Tabla 1.

Figura 1: Ficha técnica del vehículo

Marca	Mazda
Modelo	Mazda 3 Sport AT
Alimentación	Inyección

	Electrónica
Cilindrada	2 000 cm ³
Potencia	110 kW a 6500 rpm
Par	187 Nm a 4000 rpm
Consumo medio	79 cm ³ /km

Fuente: (MOTORGIGA, 2022)

Adicionalmente, en la Tabla 2 se muestran los requisitos del combustible RON87 y RON92 ecuatorianos que se comercializan en el territorio nacional.

Figura 2: Requisitos de combustibles ecuatorianos

Requisitos	Método de Ensayo	Unidad	RON92		RON87	
			Min	Max	Min	Max
RON	NTE INEN 2102	-	92	-	87	-
Destilación: 10%	ASTM D86	°C	-	70	-	70
50%	ASTM D86	°C	77	121	77	121
90%	ASTM D86	°C	-	190	-	189
Punto final	ASTM D86	°C	-	220	-	220
Residuo de destilación	ASTM D86	% ^b	-	2	-	2
Relación vapor - líquido a 60 °C	ASTM D5188	-	-	20	-	20
Presión de vapor	ASTM D323 ASTM D4953 ASTM5191	kPa	-	60	-	60
Corrosión a la lámina de cobre (3h a 50 °C)	ASTM D130	-	-	1	-	1
Contenido de gomas	ASTM D381	mg/100 mL	-	4	-	3
Contenido de azufre	ASTM D2622 ASTM D4294 ASTM D5453	% ^c	-	0,065	-	0,065

Contenido de aromáticos	ASTM D1319	% ^b		35		30
Contenido de benceno	ASTM D3606	% ^b	-	2	-	1
	ASTM D5580					
	ASTM D6277					
	ASTM D6730					
Contenido de olefinas	ASTM D1319	% ^b	-	25	-	18
Estabilidad a la oxidación	ASTM D525	min	240	-	240	-
	ASTM D7525					
Contenido de oxígeno	ASTM D4815	% ^c	-	2,7	-	2,7
	ASTM D5845					
Contenido de plomo	ASTM D3237	mg/L	-	No detectable	-	No detectable
	ASTM D5059					
	ASTM D5185					
Contenido de manganeso	ASTM D3831	mg/L	-	No detectable	-	No detectable
	ASTM D5185					
Contenido de hierro	ASTM D5185	mg/L	-	No detectable	-	No detectable
^b %		fracción		de		volumen
^c % fracción de masa						

Fuente: (INEN, 2016)

Para la recolección de datos de las temperaturas de los gases de escape, se utilizó el sensor DHT22 para la medición de la temperatura y un módulo ESP32 para la transmisión de la información mediante Wifi a la plataforma ThingSpeak.

ThingSpeak es un portal enfocado en internet de las cosas (IoT) que permite registrar, almacenar, visualizar y procesar los datos de diversos sistemas por medio de sensores instalados en ellos. Uno de los aspectos fuertes de ThingSpeak, es que admite la integración con MATLAB, Arduino, Raspberry. Para el presente trabajo, cada dato de la temperatura de los gases de escape medido por el sensor DHT22, fue almacenado en la nube de ThingSpeak en un periodo de 16 segundos hasta finalizar la prueba diaria, y posteriormente se exportaron los datos a un archivo de solo lectura en Excel. Estos dispositivos de bajo costo han permitido ser propicios para proyectos

de investigación enfocado a IoT (Shaw et al., 2019). En la Figura 1 se muestra el circuito de conexión para la medición y registro de datos de las temperaturas de los gases.

Fuente: Elaboración del autor

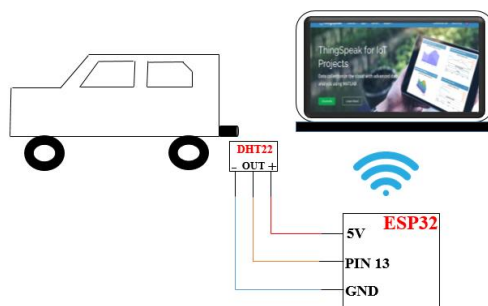


Figura 3: Conexión de los equipos para la medición y registro de datos de temperatura de los gases

Con respecto a la recolección de datos de las emisiones de gases de escape, se utilizó un equipo analizador de gases de marca Kane Autoplus el cual cumple con los estándares EN61000-6-3:2011 y EN61000-6-1:2007. Los datos de las emisiones de gases de escape, se transmitieron vía Bluetooth desde el analizador hacia la aplicación para computadora denominada Kane Live hasta la finalización de la prueba diaria, y posteriormente se exportaron los datos a un archivo de sólo lectura en Excel. Se midieron los gases HC, CO, CO₂ y O₂, cuyo registro en la aplicación se efectuó cada 3 segundos. En la Figura 2 se expone la conexión del analizador para la medición y registro de datos de emisiones de gases de escape.

Fuente: Elaboración del autor

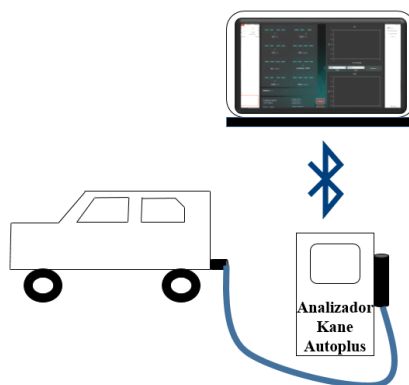


Figura 4: Circuito de conexión para medición y registro de datos de las emisiones

La sonda del analizador de gases y el sensor DHT22, se instalaron al final del conducto de escape del vehículo, tal como se demuestra en el protocolo descrito en (Lema, Arteaga, & Ruales, 2022). Se realizaron 5 tomas de datos de las temperaturas y emisiones por cada tipo de combustible a las 7:00 horas y a una altura geográfica de 2 843 msnm en la ciudad de Quito, con el objetivo de garantizar las mismas condiciones ambientales para cada prueba. La idea de ejecutar las pruebas a las primeras horas de la mañana, se debe a que las bajas temperaturas ambientales de ese momento pueden aumentar el tiempo de calentamiento necesario para que el catalizador opere con su máxima eficiencia, por lo que emitirá mayores emisiones contaminantes (Yusuf & Inambao, 2019). Además, con la toma de datos a una misma hora, se garantizó que las características de la inyección de combustible en las cámaras de combustión sean las mismas en ese horario para todos los días, ya que si se llegaba a efectuar la toma de datos a distintas horas del día, podía existir una variación de la inyección de combustible debido al cambio de la temperatura y humedad ambiental. Como medida de acción para obtener excelentes datos de emisiones de gases de escape, previo a cada prueba se debió purgar el analizador de gases con aire limpio durante 30 segundos. Una vez efectuado el proceso de purgado, el analizador de gases tiene la capacidad de registrar datos durante un tiempo de 30 minutos. En caso de querer continuar con la toma de datos, se debe efectuar el purgado nuevamente. En la Figura 3, se muestra la instalación real de los elementos de medición de temperaturas y emisión de gases de escape en el vehículo.

Fuente: Elaboración del autor



Figura 5: Instalación de elementos de medición en el vehículo

Finalmente, con los archivos almacenados, se procedió a la sincronización de los datos de emisiones de gases de escape y temperaturas para cada tipo de combustible, desde el primer registro hasta el último. Posteriormente se realizó el cálculo de los promedios de las emisiones de gases de escape y temperaturas, para generar una sola tabla consolidada.

Resultados y discusión

En la Tabla 6 se muestra un extracto corto de los promedios de emisiones de los gases de escape para RON92, sincronizados con las temperaturas. Mientras que en la Tabla 7 se exponen los promedios de emisiones y temperaturas para RON87.

Figura 6: Temperaturas y emisiones de gases de escape para RON92

Temperatura [°C]	HC [ppm]	CO [%]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]
24,72	167,6	0,072	12,74	2,336
27,12	178	0,102	13,04	2,268
29,72	178	0,106	12,8	2,166
31,8	166,6	0,066	12,7	1,992
33,58	160,6	0,06	12,62	1,892
35	153,8	0,046	12,78	1,828
36	144,2	0,042	12,78	1,812
37,04	139,8	0,038	12,96	1,792
37,74	136	0,016	12,92	1,706
38,26	135	0,018	12,96	1,658
38,64	132,8	0,034	12,98	1,628
38,94	133,2	0,032	13,08	1,586
39,02	129,8	0,032	13,3	1,564
39,18	129,6	0,032	13,32	1,534

Fuente: Elaboración del autor

Figura 7: Temperaturas y emisiones de gases de escape para RON87

Temperatura [°C]	HC [ppm]	CO [%]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]
27,66	143,4	0,012	12,68	2,164

30,24	143	0,014	12,56	2,076
32,56	136,2	0,012	12,54	2,014
34,38	132,6	0,008	12,54	1,96
36,04	129	0,008	12,62	1,888
37,52	123,2	0,004	12,8	1,848
38,44	123	0,004	13,02	1,796
39,3	122	0,006	13,04	1,73
39,88	121,4	0,022	13,3	1,714
40,24	121,4	0,022	13,36	1,694
40,34	124	0,014	13,42	1,632
40,54	117,4	0,014	13,36	1,568
40,96	114,4	0,03	13,6	1,532
41,12	118	0,034	13,6	1,56

Fuente: Elaboración del autor

Con base a los datos promedios, en la Figura 4 se muestran las comparaciones de las curvas de temperaturas de los gases de escape para RON92 y RON87. Posteriormente, en la Figura 5, se muestran las comparaciones de las curvas de emisiones de los gases de escape para ambos combustibles.

Fuente: Elaboración del autor

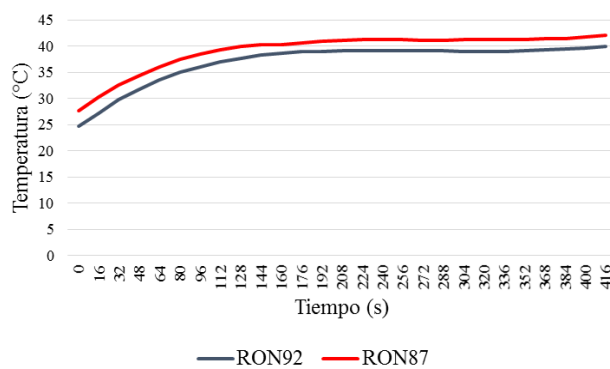


Figura 8: Curvas de temperaturas de gases de escape

Fuente: Elaboración del autor

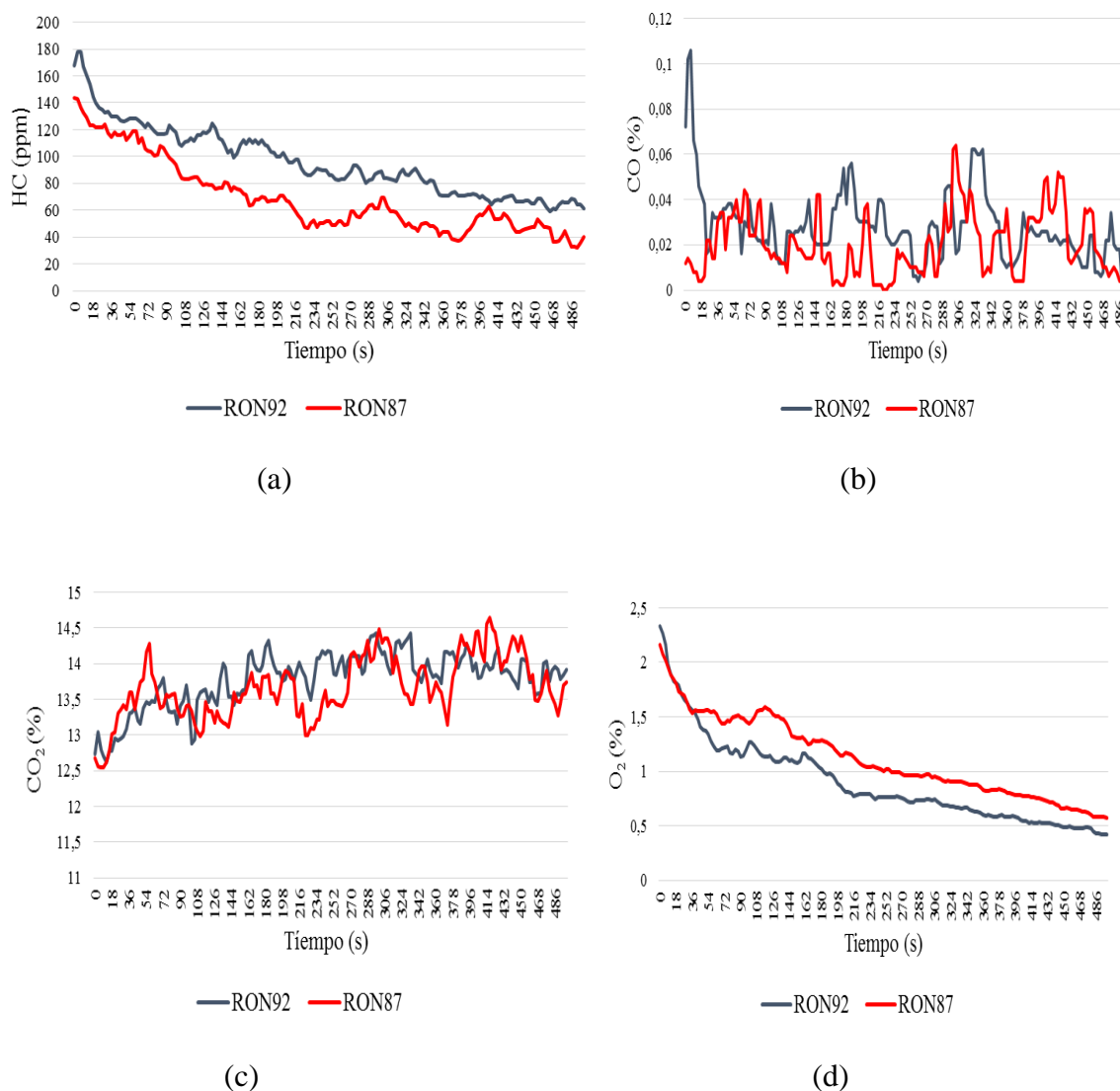


Figura 9: Curvas de emisiones de los gases. a) HC. b) CO. c) CO₂. d) O₂

Se puede observar que inicialmente las temperaturas de los gases de escape para ambos combustibles crecen rápidamente debido a que el motor se encuentra a baja temperatura. A medida que el motor alcanza la temperatura normal de funcionamiento, las temperaturas de los gases tienden a estabilizarse hasta un valor constante. Sin embargo, la curva de temperatura de los gases de escape de RON87 es superior a la de RON92. Es decir, para un determinado tiempo de funcionamiento del motor del vehículo, la temperatura de los gases para RON87 es mayor a la de RON92. Esto implicaría el hecho de que un combustible de menor octanaje tiene un mayor poder calorífico.

Con respecto a las curvas de emisiones de los gases de escape, la curva de HC para RON87 se encuentra por debajo de RON92, lo que implica que el combustible de menor octanaje genera menores emisiones de hidrocarburos no combustionados en arranque en frío. La presencia de valores altos de HC al inicio del arranque del motor (178 ppm y 143,4 ppm para RON92 y RON87 respectivamente), se debe a la presencia del estado de lazo abierto, y por lo tanto, se generan combustiones incompletas por un exceso de combustible. No obstante, con el aumento de la temperatura de los gases de escape, y por ende la del motor, las emisiones de HC en el tiempo van disminuyendo. Un aspecto a considerar, es que a pesar de tener valores altos de HC para ambos combustibles en arranque en frío, estos no superan las 400 ppm, valor límite descrito por Augeri (2011) para la emisión de este gas en los motores con inyección electrónica. Este comportamiento en arranque en frío, en donde el combustible de menor octanaje genera menores emisiones de HC con respecto al combustible de mayor octanaje, coincide con los estudios enunciados en Tipanluisa et al. (2017) a 2500 rpm y en Sayin et al. (2005)

Los resultados obtenidos con respecto a las curvas del O₂ para ambos combustibles, demuestran que tienen un comportamiento similar a las curvas de los HC, es decir, los valores descienden con el tiempo. Esto ocurre porque inicialmente en el arranque en frío, las mezclas de aire y combustible no son estequiométricas, existiendo un exceso de O₂ y combustiones incompletas. El detalle importante se centra en la curva de O₂ para RON87, la cual se encuentra por encima de la de RON92. A pesar de ello, para ambos combustibles, los valores de O₂ son menores al 2%, con lo cual se encuentran dentro de los límites de emisiones para este gas (Augeri, 2011). La mayor emisión de O₂ para RON87 del presente estudio, coincide con un comportamiento similar en Tipanluisa et al. (2017) a 2500 rpm.

Los resultados de las curvas de las emisiones de CO y CO₂ para ambos combustibles, no tienen una forma de curva definida durante el arranque en frío, aunque existe una ligera tendencia creciente con respecto al tiempo para las curvas del CO₂. Los datos varían desde 0% hasta un máximo de 0,106% para CO y desde 12,54% hasta un máximo de 14,64% para CO₂. Debido a esta situación, es necesario obtener los valores promedios de los porcentajes de CO y CO₂ para efectuar una mejor comparación.

El valor promedio del porcentaje de CO para RON92 corresponde a 0,028%, mientras que para RON87 es de 0,02%, lo que implica una ligera emisión adicional de este gas por parte del combustible de mayor octanaje. Por lo tanto, la afirmación de que el combustible de mayor RON

produce mayores emisiones de CO en arranque en frío, coincide con el estudio de Tipanluisa et al. (2017) a 700 rpm y con el estudio de Sayin et al. (2005). Para ambos combustibles, las emisiones de CO en arranque en frío se encuentran dentro de los límites descritos por Augeri (2011).

En cuanto al CO₂, el promedio de porcentaje para RON92 es de 13,77%, mientras que para RON87 es de 13,66%. Es decir, que RON92 emite ligeramente una mayor cantidad del gas de efecto invernadero. De manera general, los valores del CO₂ detallados por Augeri (2011) deben encontrarse entre el 12% y 15%, y representa la eficiencia de la combustión. La afirmación de que el CO₂ es mayor para el combustible de mayor octanaje en arranque en frío, coincide con el estudio de Tipanluisa et al. (2017) a 2500 rpm.

Sin embargo, los resultados obtenidos en Mohamad y Geok (2014) y en Binjuwair et al. (2015) con respecto al comportamiento del CO, CO₂ y HC, discrepan con las tendencias generadas de estos gases en el presente trabajo para el combustible de menor octanaje. Una de las explicaciones que se pueden generar ante estos resultados, se puede deber a las distintas características químicas del combustible que fueron utilizados en estos estudios previos.

Finalmente, el comportamiento de los gases CO y HC para RON87 del presente estudio, son similares a los ocurridos con las mezclas de los combustibles con alcoholes mostradas en Hu et al. (2006), Clairotte et al. (2013) y Martins et al.(2014). Esto es, tanto el combustible de menor octanaje como la gasolina con mezclas de metanol y etanol, emiten menores emisiones contaminantes durante el arranque en frío.

Por otro lado, es importante relacionar la temperatura con cada uno de los gases de escape, para ello, se muestran las gráficas en la Figura 6 de la regresión lineal con los valores de la Correlación de Pearson y la ecuación de la recta.

Fuente: Elaboración del autor

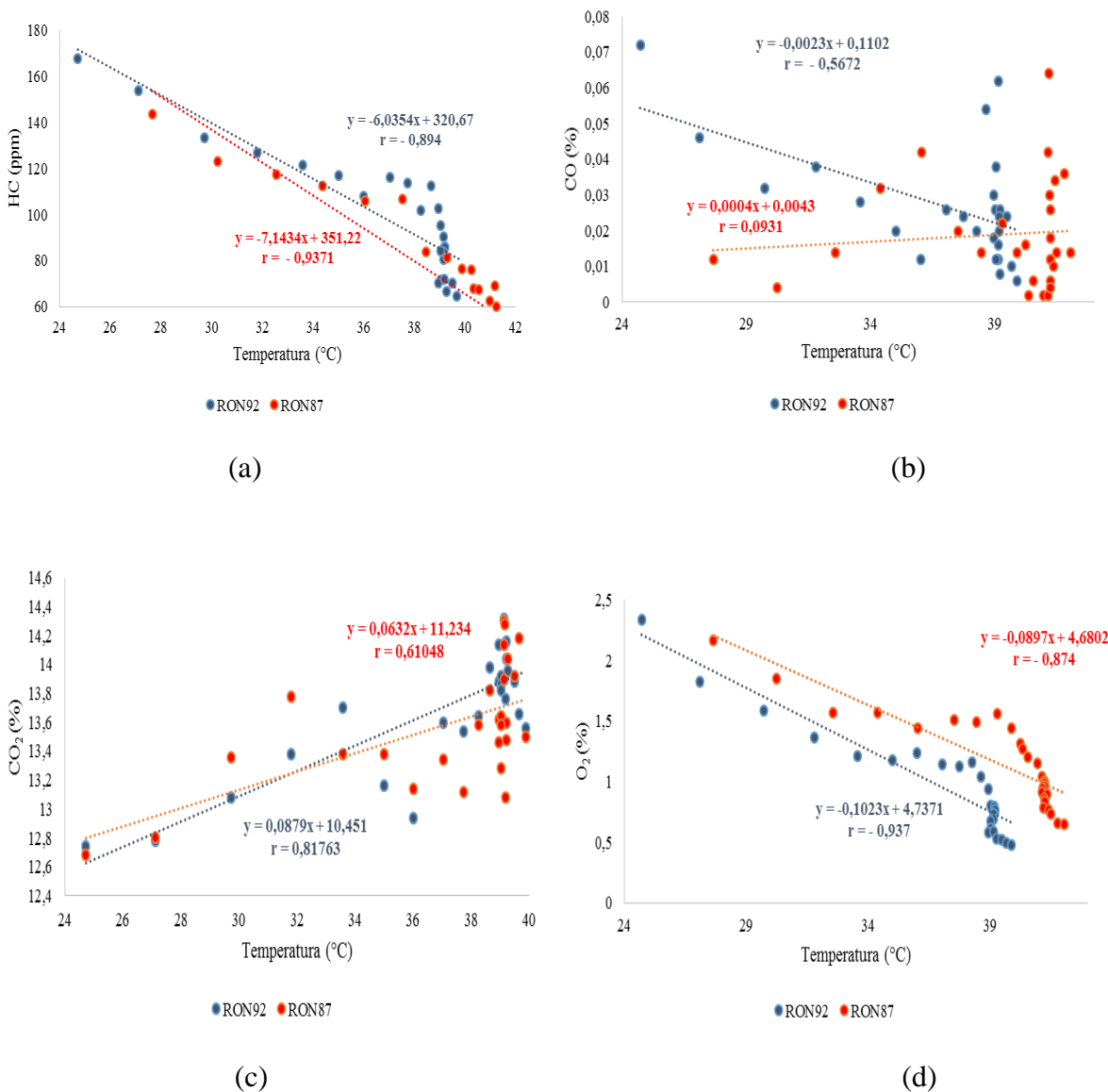


Figura 10: Correlación entre gases de escape y temperaturas. a) HC. b) CO. c) CO₂. d) O₂

Para los gases de HC y O₂ existe una fuerte correlación negativa con la temperatura para ambos combustibles, mientras que existe una correlación positiva considerable para CO₂. Sin embargo, la correlación para CO es nula en RON87 y existe una correlación media negativa para RON92. Con base a los datos obtenidos de temperaturas de los gases de escape, se pudo determinar las ecuaciones de tercer grado (1) y (2) para RON92 y RON87 respectivamente. En este contexto, la unidad de y está dada en grados Celsius [°C], mientras que x está dada en segundos [s].

$$y = 8 \times 10^{-7} x^3 - 6 \times 10^{-4} x^2 + 0,17x + 24,88 \quad (1)$$

$$y = 7 \times 10^{-7} x^3 - 6 \times 10^{-4} x^2 + 0,15x + 28,09 \quad (2)$$

Ecuaciones del HC

Mediante los datos obtenidos, se determinó las ecuaciones de los HC en función tanto de la temperatura como del tiempo. Con respecto a la ecuación en función de la temperatura, y está dada en partículas por millón [ppm], mientras que la unidad de la variable x está dada en grados Celsius [°C]. Por otra parte, para las ecuaciones en función del tiempo, y se mantiene con la misma unidad anteriormente enunciada, mientras que x está dada en segundos [s]. Las ecuaciones (3) y (4) de sexto grado, representan las ecuaciones de los HC en función de la temperatura y del tiempo respectivamente, para el combustible RON92.

$$y = -2 \times 10^{-4} x^6 + 0,04x^5 - 3,4x^4 + 140,8x^3 - 3260,7x^2 + 40164x - 205351 \quad (3)$$

$$y = 6 \times 10^{-13} x^6 - 9 \times 10^{-10} x^5 + 5 \times 10^{-7} x^4 - 2 \times 10^{-4} x^3 + 0,02x^2 - 1,88x + 176,2 \quad (4)$$

Las ecuaciones (5) y (6) representan las ecuaciones de los HC en función de la temperatura y del tiempo respectivamente, para el combustible RON87.

$$y = 6 \times 10^{-4} x^6 - 0,12x^5 + 10,9x^4 - 507,9x^3 + 13161x^2 - 181200x + 10^6 \quad (5)$$

$$y = -10^{-13} x^6 + 2 \times 10^{-10} x^5 - 10^{-7} x^4 + 3 \times 10^{-5} x^3 - 0,003x^2 - 0,31x + 135,4 \quad (6)$$

Ecuaciones del O₂

De la misma manera que para las ecuaciones de los HC, las ecuaciones del O₂ pudieron ser determinados en función de la temperatura y del tiempo manteniendo el mismo grado de las ecuaciones y unidades de las variables, a excepción de la variable y la cual está dada en porcentaje [%]. Las ecuaciones (7) y (8), representan las ecuaciones en función de la temperatura y tiempo respectivamente para el combustible RON92.

$$y = 9 \times 10^{-6} x^6 - 1,9 \times 10^{-3} x^5 + 0,15x^4 - 6,7x^3 + 164,32x^2 - 2127,4x + 11401 \quad (7)$$

$$y = 9 \times 10^{-15} x^6 - 10^{-11} x^5 + 9 \times 10^{-9} x^4 - 3 \times 10^{-6} x^3 + 4 \times 10^{-4} x^2 - 0,03x + 2,3 \quad (8)$$

Las ecuaciones (9) y (10) representan el O₂ para RON87, en función de la temperatura y del tiempo respectivamente.

$$y = 10^{-5} x^6 - 3,1 \times 10^{-3} x^5 + 0,27x^4 - 12,8x^3 + 333,37x^2 - 4601,4x + 26335 \quad (9)$$

$$y = 9 \times 10^{-15} x^6 - 10^{-11} x^5 + 9 \times 10^{-9} x^4 - 3 \times 10^{-6} x^3 + 4 \times 10^{-4} x^2 - 0,02x + 2,12 \quad (10)$$

Conclusiones

Con los resultados obtenidos del presente trabajo, se demuestra en primera instancia que el combustible RON87 tiene mayor poder calorífico que el combustible RON92, debido a que las temperaturas de gases de escape son más altas para RON87, pero este aspecto podría generar un mayor desgaste entre los elementos constitutivos del motor durante el arranque en frío. Esta hipótesis se consolida con el hecho de que el precio del combustible RON87 es más económico que RON92. La omisión de la señal del sensor de oxígeno por parte de la ECU, provoca que en los primeros instantes del arranque del motor, se generen combustiones incompletas, y con ello, emisiones altas de HC y O₂. La tendencia decreciente de los HC y O₂ para ambos combustibles, demuestran claramente la presencia del lazo abierto del sistema de control de inyección electrónica en los primeros minutos del funcionamiento del motor. Así mismo RON87 genera menores emisiones de HC, CO y CO₂, con respecto a RON92. Cuando el motor alcance la temperatura normal de funcionamiento, las curvas de temperaturas de los gases de escape tenderán a converger. Por lo tanto, el uso de un combustible ecuatoriano de mayor número de octano, no necesariamente es mejor en términos de emisiones contaminantes. Existe una fuerte correlación entre las temperaturas y los valores de los gases de HC y O₂ tanto para RON92 como para RON87. No obstante, la correlación de las temperaturas con los gases de CO y CO₂ disminuyen considerablemente, es decir, estos dos gases tienen una relación moderada con la temperatura para ambos combustibles. La excepción se encuentra entre la correlación entre CO y la temperatura para RON87, la cual es nula. Las curvas de HC y CO, se comportan como una función matemática, por lo que se determinaron sus ecuaciones en base al tiempo y a las temperaturas de los gases de escape. Las tendencias de los resultados obtenidos en arranque en frío coinciden con algunas investigaciones previas las cuales no involucran exclusivamente al arranque en frío. Así mismo, RON87 emite menores emisiones al igual que combustibles mezclados con alcoholes. Por último, sería oportuno que en próximas investigaciones, se deba comparar las emisiones de gases de escape, considerando otras variables que inciden en el funcionamiento del motor de combustión interna como: altitud geográfica, temperatura ambiental, combustibles alternativos, otros sistemas de inyección y ciclos termodinámicos, con el

objetivo de poder generar una teoría general consolidada. Por ejemplo, los vehículos con motor de combustión a diésel, tienden a emitir una menor cantidad de HC pero más PM₁₀ con respecto a los motores de combustión a gasolina, por lo tanto, sería pertinente comparar las emisiones de gases de escape de un vehículo con motor diésel en arranque en frío.

Referencias

1. Augeri, F., (2011). Análisis de los gases de escape de los motores de combustión interna, CISE. <http://www.cise.com/portal/notas-tecnicas/item/302-análisis-de-los-gases-de-escape->
2. Bielaczyc, P., Szczotka, A., & Woodburn, J. (2011). The effect of a low ambient temperature on the cold-start emissions and fuel consumption of passenger cars: <http://Dx.Doi.Org/10.1177/0954407011406613>, 225(9), 1253–1264. <https://doi.org/10.1177/0954407011406613>
3. Binjuwair, S., Mohamad, T. I., Almaleki, A., Alkudsi, A., & Alshunaifi, I. (2015). The effects of research octane number and fuel systems on the performance and emissions of a spark ignition engine: A study on Saudi Arabian RON91 and RON95 with port injection and direct injection systems. *Fuel*, 158, 351–360. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2015.05.041>
4. Brancato, V., Gioiella, F., Imparato, G., Guarnieri, D., Urciuolo, F., & Netti, P. A. (2018). 3D breast cancer microtissue reveals the role of tumor microenvironment on the transport and efficacy of free-doxorubicin in vitro. *Acta Biomaterialia*, 75, 200–212. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2018.05.055>
5. Clairotte, M., Adam, T. W., Zardini, A. A., Manfredi, U., Martini, G., Krasenbrink, A., ... Astorga, C. (2013). Effects of low temperature on the cold start gaseous emissions from light duty vehicles fuelled by ethanol-blended gasoline. *Applied Energy*, 102, 44–54. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.08.010>
6. Dardiotis, C., Martini, G., Marotta, A., & Manfredi, U. (2013). Low-temperature cold-start gaseous emissions of late technology passenger cars. *Applied Energy*, 111, 468–478. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.04.093>
7. Faulin, J., Grasman, S. E., Juan, A. A., & Hirsch, P. (2019). Sustainable Transportation: Concepts and Current Practices. *Sustainable Transportation and Smart Logistics*:

- Decision-Making Models and Solutions*, 3–23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814242-4.00001-6>
8. Flores, J. F., Byron, J., & Romero, A. S. (2016). Desarrollo de una base de datos de los mecanismos de formación de monóxido de carbono e hidrocarburos no combustionados de los vehículos pertenecientes al parque automotor de la ciudad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12748>
 9. Gaviria G, C., Benavides C, P., & Tangarife, C. (2011). Contaminación por material particulado (PM2, 5 y PM10) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 2008–2009.
 10. Hu, T., Wei, Y., Liu, S., & Zhou, L. (2006). Improvement of Spark-Ignition (SI) Engine Combustion and Emission during Cold Start, Fueled with Methanol/Gasoline Blends. *Energy and Fuels*, 21(1), 171–175. <https://doi.org/10.1021/EF0603479>
 11. INEN. (2016). PRODUCTOS DERIVADOS DE PETRÓLEO. GASOLINA. REQUISITOS. NTE INEN 935 Novena revisión. PRODUC. *Inen*.
 12. Lema, J., Arteaga, G., & Ruales, B. (2022). Comparison of the Operating Parameters of an Internal Combustion Engine During Cold Start, by Applying Two Ecuadorian Fuels of Different Octane Numbers. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 379 LNNS, 14–25. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94262-5_2/COVER
 13. Lopez-Arboleda, E., Sarmiento, A. T., & Cardenas, L. M. (2021). Systemic approach for integration of sustainability in evaluation of public policies for adoption of electric vehicles. *Systemic Practice and Action Research*, 34(4), 399–417. <https://doi.org/10.1007/S11213-020-09540-X/FIGURES/3>
 14. Martins, A. A., Rocha, R. A. D., & Sodré, J. R. (2014). Cold start and full cycle emissions from a flexible fuel vehicle operating with natural gas, ethanol and gasoline. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 17, 94–98. <https://doi.org/10.1016/J.JNGSE.2014.01.004>
 15. Meneses, E., Turto, L., & Molina, E. (2004). “LA CONTAMINACION DEL AIRE: SU REPERCUSSION COMO PROBLEMA DE SALUD”. IMSTITUTO NACIONAL DE HIGENE, EPIDEMOLOGIA Y MICROBIOLOGIA" -CUBA. *Revista Electrónica Ecosolar*, 44, 2. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1561-30032006000200008

16. Mohamad, T. I., & Geok, H. H. (2014). Part-load performance and emissions of a spark ignition engine fueled with RON95 and RON97 gasoline: Technical viewpoint on Malaysia's fuel price debate. *Energy Conversion and Management*, 88, 928–935. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.09.008>
17. MOTORGIGA (2022). Mazda 3 5p Sportive 2.0. Precio y ficha técnica.. Retrieved September 21, 2022, from <https://motorgiga.com/mazda/mazda3/3-5p-sportive-20-150cv/2006/precio-ficha-tecnica>
18. Pospisil, J., & Jicha, M. (2017). Influence of vehicle-induced turbulence on pollutant dispersion in street canyon and adjacent urban area. *International Journal of Environment and Pollution*, 62(2–4), 89–101. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2017.089400>
19. Ramos, A., Muñoz, J., Andrés, F., & Armas, O. (2018). NOx emissions from diesel light duty vehicle tested under NEDC and real-word driving conditions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 37–48. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2018.04.018>
20. Saliba, G., Saleh, R., Zhao, Y., Presto, A. A., Lambe, A. T., Frodin, B., ... Robinson, A. L. (2017). Comparison of Gasoline Direct-Injection (GDI) and Port Fuel Injection (PFI) Vehicle Emissions: Emission Certification Standards, Cold-Start, Secondary Organic Aerosol Formation Potential, and Potential Climate Impacts. *Environmental Science and Technology*, 51(11), 6542–6552. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.6B06509/SUPPL_FILE/ES6B06509_SI_001.PDF
21. Santos, G. (2017). Road transport and CO2 emissions: What are the challenges? *Transport Policy*, 59, 71–74. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2017.06.007>
22. Sayin, C., Kilicaslan, I., Canakci, M., & Ozsezen, N. (2005). An experimental study of the effect of octane number higher than engine requirement on the engine performance and emissions. *Applied Thermal Engineering*, 25(8–9), 1315–1324. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2004.07.009>
23. Shaw, S., Hou, Y., Zhong, W., Sun, Q., Guan, T., & Su, L. (2019). Instantaneous fuel consumption estimation using smartphones. *IEEE Vehicular Technology Conference, 2019-September*. <https://doi.org/10.1109/VTCFALL.2019.8891261>
24. Tipanluisa, L. E., Remache, A. P., Ayabaca, C. R., & Reina, S. W. (2017). Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina Funcionando a dos Cotas con Combustibles de

dos Calidades. *Información Tecnológica*, 28(1), 03–12. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000100002>

25. Yusuf, A. A., & Inambao, F. L. (2019). Effect of cold start emissions from gasoline-fueled engines of light-duty vehicles at low and high ambient temperatures: Recent trends. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100417. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2019.100417>
26. Zarandi, S. M., Shahsavani, A., Nasiri, R., & Pradhan, B. (2021). A hybrid model of environmental impact assessment of PM2.5 concentration using multi-criteria decision-making (MCDM) and geographical information system (GIS)—a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(3), 1–20. <https://doi.org/10.1007/S12517-021-06474-Z/FIGURES/15>

© 2022 por el autor. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).