



## **Análisis, estudio y modelamiento matemático para la caracterización energética de las gasolinas comerciales en función de los parámetros de calidad referentes a las normas ASTM**

### **Analysis, study and mathematical modeling for the energy characterization of commercial gasolines as a function of quality parameters in ASTM standards**

EDGAR CASTILLO RIVERA<sup>1</sup>, LUIS MORA DÍAZ<sup>1</sup>, EDUARDO GUTIÉRREZ GUALOTUÑA<sup>1</sup>, OSMEL MARTÍNEZ VALDÉZ<sup>2</sup>, PAÚL TAFUR ESCANTA<sup>1</sup>, ANDRÉ SORIA AMANCHA<sup>1</sup>, ÁNGELO VILLAVICENCIO POVEDA<sup>1</sup>, GABRIELA TORRES RODRÍGUEZ<sup>3</sup> y RAÚL BALDEÓN LÓPEZ<sup>4</sup>

#### **RESUMEN**

Se presenta una propuesta en la que se realiza el análisis energético respectivo para la caracterización del poder calorífico de las gasolinas comerciales en Ecuador como: Super, Extra y Ecopaís. Este estudio se realiza en el laboratorio de motores de combustión interna de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, con el propósito de obtener modelos matemáticos que relacionan los parámetros energéticos y de calidad de las gasolinas. Modelos que se obtendrán a través de herramientas computacionales como Red Neuronal Artificial (RNA), las mismas que utilizarán un conjunto de datos históricos proporcionados por la Agencia de

<sup>1</sup>Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Sangolquí, Ecuador.

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba.

<sup>3</sup>Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero. Quito, Ecuador.

<sup>4</sup>Universidad Tecnológica Equinoccial-UTE. Quito, Ecuador.

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Aporte Santiaguino de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4,0 Internacional. (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

*Edgar Castillo, Luis Mora, Eduardo Gutiérrez, Osmel Martínez, Paúl Tafur, André Soria, Ángelo Villavicencio, Gabriela Torres, Raúl Baldeón*

Regulación y Control Hidrocarburífera (ARCH) del Ecuador, para su validación.

**Palabras clave:** poder calorífico; gasolinas; super; extra; ecopaís.

## **ABSTRACT**

A proposal is presented in which the respective energy analysis is carried out to characterize the calorific value of commercial gasolines in Ecuador as: Super, Extra and Ecopaís. This study is carried out in the laboratory of internal combustion engines of the University of the Armed Forces-ESPE, with the purpose of obtaining mathematical models that relate the energy and quality parameters of gasolines. Models that will be obtained through computational tools such as artificial neural network (ANN), which will use a set of historical data provided by the Agency for Regulation and Control of Hydrocarbons (ARCH) of Ecuador, for validation.

**Keywords:** calorific power; gasolines; super; extra; ecopaís.

## **INTRODUCCIÓN**

El uso de combustibles líquidos (gasolinas y diesel), para procesos de transporte y generación de energía termoeléctrica en el entorno mundial, aportan en gran medida con las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) entre otros, que en la actualidad han registrado una tendencia ascendente desde 1971. Según el Banco Mundial y el centro de análisis de información sobre el Dióxido de carbono, División de Ciencias Ambientales del Laboratorio de Oak Ridge (Tennessee, EEUU), las emisiones de  $CO_2$  para el año 2016 fueron aproximadamente de 36, 4 Gt/año. Los combustibles fósiles son la fuente dominante de energía en el planeta, su uso intensivo representa el agotamiento de un recurso natural no renovable, además de alterar negativamente la calidad del aire producto de las emisiones provenientes de su combustión. En Ecuador para el 2014 se tuvieron aproximadamente 43, 92 Mt/año de  $CO_2$  que se emitieron al ambiente.

La problemática anterior está directamente relacionada con la demanda de combustibles líquidos sobre todo las gasolinas, que en los diferentes países de la región se encuentra estrechamente ligada al precio y a la calidad de la misma, cada país mantiene una cadena de distri-

bución propia, en unos casos parte directamente de la refinación del hidrocarburo y termina en las comercializadoras y en otros casos parte desde la importación de nafta para su procesamiento y posterior distribución, en esta cadena la calidad del combustible es susceptible a adulteración (INEC, 2016).

Uno de los parámetros importantes que determinan la calidad de las gasolinas es el llamado octanaje, que no es más que una medida de la calidad y capacidad antidetonante de las gasolinas, en Sudamérica por ejemplo las naftas con mayores índices de octano son Argentina y Perú con 98, seguido por Brasil con 95 y Colombia con 92 octanos respectivamente.

El número de octano (RON) en las gasolinas se vincula erróneamente con el kilometraje recorrido por galón, sin tomar en cuenta que la gasolina influye en el motor no solo en su eficacia, sino también en su eficiencia. En lo referente a eficacia se analizan parámetros como rendimiento, respuesta de rapidez de aceleración, torque, potencia, velocidad tope, entre otras; mientras que en la eficiencia el parámetro energético de calidad que influye directamente es el llamado poder calorífico, que tiene relación directa con el rendimiento volumétrico y el consumo específico de combustible, parámetros importantes en el diseño del motor.

Otros parámetros importantes a considerar en base al rendimiento de un motor alternativo que cumpla con el ciclo OTTO son: la volatilidad expresada en términos de destilación y presión de vapor, el contenido de azufre, la calidad anticorrosiva, densidad apropiada, estabilidad a la oxidación, el contenido de impurezas, entre otras. Todas estas deben ser balanceadas de acuerdo a las normas por entes estatales reguladores, a fin de que aseguren un correcto funcionamiento, buen arranque, consumo de combustible mínimo, adecuada potencia y aceleración de la máquina en un amplio contenido de condiciones operativas, con el objetivo de disminuir las emisiones (Castillo, et al., 2012).

En Ecuador el ente fiscalizador encargado es la Agencia de Regulación y Control Hidrocarbúfero (ARCH), donde funciona el Centro Nacional de Control de Calidad de Hidrocarburos, cuya misión es el control de la calidad del petróleo, de sus derivados y de los biocombustibles comercializados a nivel nacional e internacional, en este centro se puede

*Edgar Castillo, Luis Mora, Eduardo Gutiérrez, Osmel Martínez, Paúl Tafur, André Soria, Ángelo Villavicencio, Gabriela Torres, Raúl Baldeón*

cuantificar cuantitativa y cualitativamente la calidad de los combustibles y biocombustibles mediante pruebas de laboratorio, con la aplicación de normas y estándares internacionales basándose en la norma INEN 935 revisión del 2016.

Bajo este marco las gasolinas en Ecuador provienen de la Refinería Estatal de Esmeraldas, Refinería Libertad y Refinería Shushufindi. Según la NORMA INEN 935, las gasolinas de acuerdo a su octanaje se clasifican en dos tipos:

- Gasolina SÚPER con aproximadamente 92 octanos.
- Gasolina EXTRA y ECOPAÍS con aproximadamente 87 octanos.

La gasolina ECOPAIS es una mezcla de gasolina extra base con 5 % de etanol anhidro, dicha mezcla es realizada en el terminal de Hidrocarburos de Pascuales, en la ciudad de Guayaquil donde es comercializada principalmente (Poveda, et al., 2013; Druet, Vera, 2017).

En la tabla 1 se indica las exigencias que debe cumplir la gasolina SÚPER, según la norma NTE INEN 935 la cual controla los requerimientos que esta debe tener.

Tabla 1. Requisitos para la gasolina SUPER según la Norma NTE INEN 935

	Unidad	Mínimo	Máximo
Número de Octano Research	RON	90, 0	-
Destilación 10 %	°C	-	70
Destilación 50 %	°C	77	121
Destilación 90 %	°C	-	190
Punto final	°C	-	220
Presión de Vapor	kPa	-	56
Contenido de gomas	mg/100cm <sup>3</sup>	-	4, 0
Contenido de azufre	%	-	0, 1
Contenido de aromáticos	%	-	35, 0
Contenido de benceno	%	-	2, 0
Contenido de olefinas	%	-	25, 0
Estabilidad de oxidación	Mín	240	-
Contenido de oxígeno	%	-	2, 7

### **Gasolina Extra**

En la NORMA NTE INEN 935, regulan también las exigencias que debe tener la gasolina extra para el funcionamiento en motores de encendido por chispa, en la tabla 2 se indican los requisitos que debe cumplir ésta gasolina.

Tabla 2. Requisitos para la gasolina EXTRA según la Norma NTE INEN 935

	Unidad	Mínimo	Máximo
Número de Octano Research	RON	81, 0	-
Destilación 10 %	°C	-	70
Destilación 50 %	°C	77	121
Destilación 90 %	°C	-	189
Punto final	°C	-	215
Presión de Vapor	kPa	-	56
Contenido de gomas	mg/100cm <sup>3</sup>	-	3, 0
Contenido de azufre	%	-	0, 075
Contenido de aromáticos	%	-	30, 0
Contenido de benceno	%	-	1, 0
Contenido de olefinas	%	-	18, 0
Estabilidad de oxidación	Mín	240	-
Contenido de oxígeno	%	-	2, 7

### **Gasolina EcoPaís**

Para el Cambio de la Matriz Productiva en el Ecuador, el Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad (MCPEC) en concordancia con el Decreto Ejecutivo 675 y el Plan Nacional del Buen Vivir; fomentaron la producción de la gasolina ECOPAÍS, un biocombustible compuesto de 5 % de bioetanol (proveniente de la caña de azúcar) y un 95 % de gasolina base, que posee un octanaje de 85 octanos y precio de la gasolina Extra.

Es importante notar que dentro de los parámetros de calidad no se toma en cuenta al poder calorífico de las gasolinas en el Ecuador, y al realizar un análisis del estado del arte se puede observar que a nivel regional y mundial tampoco, por ejemplo Xiongbo, et al. (2018) evaluó el rendimiento, combustión y detonación a una alta relación de compresión en un motor de encendido por chispa de alto rendimiento, combustión pobre y alimentado con n-butano y mezcla de gas de metano licuado expuso que la presión en el cilindro, la tasa de liberación de calor y la cantidad acumulada de liberación de calor aumentan con el aumento de la par-

*Edgar Castillo, Luis Mora, Eduardo Gutiérrez, Osmel Martínez, Paúl Tafur, André Soria, Ángelo Villavicencio, Gabriela Torres, Raúl Baldeón*

ticipación de energía del n-butano. El IMEP y la eficiencia térmica indicada aumentan en primer lugar con el aumento del porcentaje de la participación de energía del n-butano y luego disminuyen.

Zhang, et al. (2018), en su investigación sobre los efectos de la adición de metano en las emisiones de gases de escape y la eficiencia de la combustión de la combustión premezclada de n-heptano/aire determinó que en la relación  $C/O$  de n-heptano/aire y n-heptano/metano/aire-mezclas, la velocidad de reacción de  $(CO + OH = CO_2 + H)$  aumentó con la adición de metano, que a su vez redujo las emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono; y además mejoró la eficiencia de combustión. Casanova, et al. (2018), en un estudio sobre la combustión híbrida de metano y butanol en un MCI con un dosado estequiométrico y concluyen que al aumentar el porcentaje de metano reduce el trabajo indicado y el rendimiento indicado, pero por su significativamente mayor poder calorífico se reduce el consumo específico de combustible. La menor velocidad de llama laminar del metano reduce al velocidad media del frente de llama y alarga la combustión. . El butanol al ser líquido beneficia el llenado por su calor latente de evaporación. Las emisiones de CO aumentan con porcentajes 50 % -50 % pero su variabilidad es pequeña.

Al analizar el efecto de la adición de hidrógeno en los parámetros de rendimiento y emisión de un motor de encendido por chispa que es alimentado con mezclas de butanol en condiciones estequiométricas, Raviteja, y Kumar (2015), indicaron que la eficiencia del motor mejoró el enriquecimiento de hidrógeno. Observaron un promedio de reducción del 60 % en las emisiones de  $HC$  y  $CO$  con un 10 % de enriquecimiento de hidrógeno, mientras que las emisiones de  $NO$  casi se duplicaron. El análisis de combustión mostró períodos de retraso reducidos, duraciones de combustión más cortas, presiones más altas del cilindro, temperaturas más altas y una combustión mejorada.

En un estudio sobre el comportamiento de motores a gasolina respecto a la variación del octanaje, Ávila y Ayala (2013), determinan que el poder calorífico de la gasolina varía en función del contenido de carbono e hidrógeno y que será mayor mientras su contenido de hidrógeno sea superior.

*Análisis, Estudio y Modelamiento Matemático para la Caracterización Energética de las Gasolinas Comerciales en Función de los Parámetros de Calidad referentes a las Normas ASTM*

En una investigación sobre el estudio de las mezclas de gasolina Extra con aditivos orgánicos, (Chuliquinga y Ruiz, 2016), indican que se presenta una disminución de su potencial energético de hasta 0, 597 %, debido a que tanto el etanol (29258, 828 kJ/kg), como el metanol (22692, 305 kJ/kg) poseen un poder calorífico superior mucho menor al de la gasolina Extra (45610, 533 kJ/kg). También muestran que se incrementa el índice de octano mientras mayor es la concentración de alcohol en esta gasolina, siendo las mezclas de etanol las que mejor octanaje presentan en comparación con las de metanol, teniendo así que E15 alcanza el valor más alto con 93, 4 octanos.

Parada y Villalba (2016) analizan y comparan las gasolinas Extra, Ecopaís y E10, en términos de torque, potencia, octanaje, gases y pruebas de laboratorio, donde obtuvieron un incremento en parámetros efectivos del motor, así como un incremento de gases contaminantes con los biocombustibles.

Al realizar las pruebas de desempeño del potencial mecánico del motor Mazda F2, Quimbita y Guallichico (2017), señalan que la gasolina ECOPAÍS tuvo un incremento en potencia y torque pero un decremento en poder calorífico, caso contrario en SÚPER y EXTRA, tuvo un decremento en potencia, torque y en el poder calorífico un incremento superior al de la ECOPAÍS.

Druet y Vera (2017), evalúan la efectividad de los aditivos comerciales utilizados para incrementar el octanaje de las gasolinas en el Ecuador, mediante ensayos fisicoquímicos de los parámetros de la gasolina, de acuerdo a las especificaciones de la Normativa Técnica INEN 935. Una vez realizado el análisis del estado del arte se observa que en esta información no se toma en cuenta el impacto del poder calorífico en los parámetros considerados de calidad para las gasolinas, menos aún un modelo que relacione el grado de relevancia de estos parámetros en función del parámetro energético, objetivo principal de ésta investigación, es así que se realizan análisis por diferentes métodos matemáticos para el establecimiento de un modelo que cumpla o satisfaga ésta relación aparte de que se muestre la bondad del modelo escogido.

*Edgar Castillo, Luis Mora, Eduardo Gutiérrez, Osmel Martínez, Paúl Tafur, André Soria, Ángelo Villavicencio, Gabriela Torres, Raúl Baldeón*

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se realizó un diseño experimental libre puesto que no se pueden controlar los valores de las variables independientes, ya que todos estos valores en el caso de las gasolinas son controlados en las refinerías y no se puede establecer una variación, por lo tanto se utiliza un tamaño de muestra considerado como grande, en nuestro caso 1500 muestras establecidas con datos históricos y datos medidos en la presente investigación. Para encontrar el Poder Calorífico de las gasolinas se utiliza una bomba calorimétrica adiabática marca Gallenkamp, figura 1 que permite determinar este parámetro, mediante la combustión de una determinada cantidad de masa del combustible (0,8 g), dentro de una bomba que contiene  $O_2$  a una presión de 14,7 bar, se tomará como referencia el poder calorífico del ácido benzoico para la ejecución de las pruebas.



Figura 1. Bomba calorimétrica adiabática Gallenkamp

El poder calorífico encontrado en la bomba calorimétrica representa al superior el mismo que se sujeta a la siguiente expresión:

$$PCS = PCI + 2442\left(\frac{m_w}{m_f}\right)$$

Donde:

$PCS$ =Poder calorífico superior ( $kJ/kg$ ),  $PCI$ =Poder calorífico inferior ( $kJ/kg$ ),  $m_w$ =masa de agua en los productos y  $m_f$ =masa de combustible

### **Descripción del proceso de evaluación de la calidad de las gasolinas en la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero**

Como parte de esta investigación se consiguió datos históricos de la agencia que controla la calidad de las gasolinas en el Ecuador. Existen varios procesos que realiza esta institución para la verificación y control del combustible líquido que se comercializa en el país. En la ARCH se realizan mediciones del número de octano, el porcentaje en volumen de Benceno, el porcentaje en volumen de Etanol, el porcentaje en volumen de Oleofinas, el porcentaje en volumen de Aromáticos, el porcentaje en masa y ppm de contenido de Azufre. Los equipos utilizados para este fin son un octanometro y el analizador de combustible que mide etanol, metanol y combustibles sintéticos. Para encontrar la correlación existente entre los parámetros de calidad y el poder calorífico se usó el método de redes neuronales artificiales usando la herramienta de matlab y simulink.

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Para poder realizar una interpretación clara de los datos experimentales y poder hallar la correlación con los datos históricos se utilizaron cálculos estadísticos que se resumen en la tabla 5, la que nos muestra los promedios de los parámetros acreditados y no acreditados de los datos históricos y experimentales.

Tabla 3. Promedios estadísticos de datos Históricos y experimentales

Valores medidos de los parámetros		Datos históricos ARCH			Datos experimentales		
		Extra	Súper	Eco P.	Extra	Súper	Eco P.
Parámetros no acreditados	Número de octano research (RON)	85,79	92,56	86,31	85,68	91,55	87,64
	Benceno % volumen	0,54	0,61	0,44	0,54	0,59	0,44
	Etanol %volumen	-	-	1,97	-	-	1,10
	Olefinas %volumen	11,98	13,67	9,44	11,12	13,74	8,60
Parámetros acreditados	Aromáticos %volumen	22,12	24,03	19,05	22,37	24,91	19,30
	Contenido de ppm	301,35	166,70	82,86	273,20	357,45	47,18
	Azufre %m	0,03	0,01	0,008	0,027	0,03	0,004

### **Redes Neuronales Artificiales para la predicción del poder calorífico de gasolinas en Ecuador**

Para crear las RNA se utiliza la herramienta denominada Neural Net Fitting perteneciente al Deep Learning Toolbox 12.0 de MatLab R2018b, la que permite crear RNA para la reso-

*Edgar Castillo, Luis Mora, Eduardo Gutiérrez, Osmel Martínez, Paúl Tafur, André Soria, Angelo Villavicencio, Gabriela Torres, Raúl Baldeón*

lución de problemas de ajustes utilizando redes de tipo feed-forward con dos capas ocultas. Esta herramienta realiza, además, toda la gestión de información de entrada-salida para poder variar operativamente la configuración de la red y visualizar el comportamiento de los indicadores  $R^2$  y el error de ajuste  $S$  con respecto a los datos seleccionados para entrenar la red y para su validación.

Para el entrenamiento de las redes se adoptó un 15 % de los datos para la validación, un 15 % para la verificación y el 70 % para el entrenamiento. En la capa oculta se utilizan diez neuronas como se muestra en la figura 2.

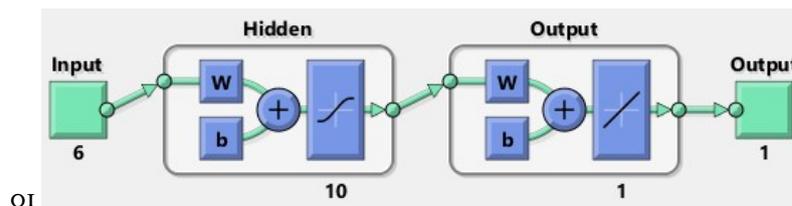


Figura 2. Esquema general de la RNA empleada. Figura generada por MatLab R2018b

La función de transferencia empleada para la realización del ajuste es la función tangente sigmoide, la cual es establecida por defecto por esta herramienta de MatLab. Esta función entrega una salida que se encuentra en el rango de  $-1, 0$  a  $1, 0$  y es utilizada con frecuencia para el ajuste de datos en problemas similares al estudiado. El entrenamiento de la red se realizó mediante el algoritmo de regularización Bayesiana, el cual, si bien requiere más tiempo de cálculo para la determinación de los coeficientes de pesos en los nodos de la red por la utilización de un procedimiento de tipo adaptativo, resultó ser el más adecuado para el ajuste de los datos según las pruebas realizadas a priori con todas las opciones de algoritmos disponibles a emplear. A partir de los entrenamientos realizados para cada tipo de gasolina, se determinaron los coeficientes óptimos de pesos  $w$  y los coeficientes  $b$  para la capa oculta y para la capa de salida en dada red elaborada. En lo adelante se muestran los valores correspondientes.

#### **Gasolina Súper Comercializada:**

$$b_{co} = [-2,55490 \quad 3,50451 \quad -0,71777 \quad -1,31214 \quad 2,3046 \quad 2,24774 \quad -0,7490 \quad 70,95638 \quad -0,82252 \quad -1,93622]^t$$

*Análisis, Estudio y Modelamiento Matemático para la Caracterización Energética de las Gasolinas Comerciales en Función de los Parámetros de Calidad referentes a las Normas ASTM*

$$W_{co} = \begin{bmatrix} 0,9836 & -0,27430 & 0,77434 & 1,69096 & 1,10545 & -0,51515 & -1,92104 & 3,49829 & 2,77387 & -2,45069 \\ 0,50021 & 0,21360 & -0,79638 & -1,41742 & -1,10308 & 2,16793 & -3,55915 & 0,03223 & 1,35284 & -1,69458 \\ 0,35932 & -0,64562 & 3,87524 & 2,44735 & -2,17235 & 1,79775 & -3,06721 & -1,43060 & -5,73674 & 0,0524969 \\ -0,68396 & 0,0305 & -1,5567 & -0,58802 & 1,39813 & 0,93 & -0,876115 & 1,1624 & 2,23005 & 0,074084 \\ -1,64921 & -4,96601 & -0,59518 & -1,94418 & -0,22776 & -2,97077 & 0,81503 & 0,97343 & 1,44663 & 2,743321 \end{bmatrix}$$

$$b_{cs} = [-2,7413022]$$

$$W_{cs} = [0,62442 \quad -2,34471 \quad 4,8846 \quad -1,958738 \quad 2,76572 \quad 3,74235 \quad 2,69903 \quad -0,43087 \quad 3,19750 \quad -1,38575]$$

El porcentaje de ajuste de esta RNA es  $R^2 = 98,051\%$  y el error es  $S = 104,70$ .

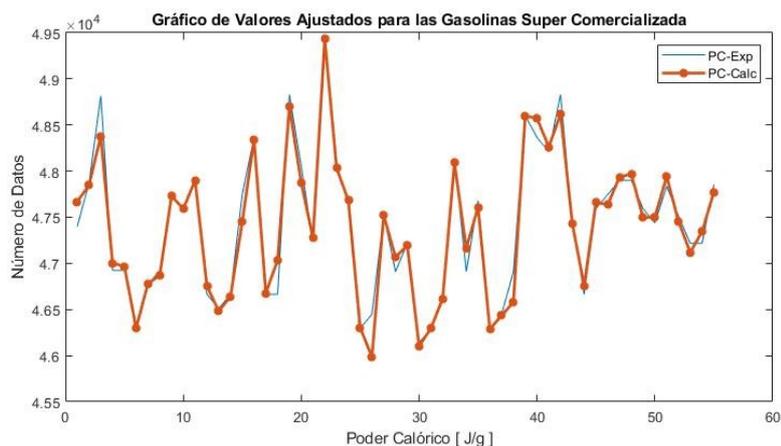


Figura 3. Ajuste de la RNA desarrollada para las gasolinas Súper Comercializada

**Gasolina Extra Comercializada:**

$$b_{co} = [-0,1702 \quad 0,3591 \quad -0,1670 \quad 0,1727 \quad 0,1584 \quad 1,4038 \quad 0,679 \quad -0,1552 \quad 0,12681 \quad -0,6308]^t$$

$$W_{co} = \begin{bmatrix} -0,0303 & -0,5329 & -0,034410 & 0,026960 & 0,04528 & 1,996186 & 0,745797 & -0,049180 & -0,029824 & -1,37257 \\ 0,00573 & 1,3069 & 0,00385 & -0,007288 & 0,001042 & 0,529753 & 0,21836 & -0,002744 & -0,814613 & -0,07566 \\ 0,06807 & 0,540863 & 0,068589 & -0,067683 & -0,070105 & 0,73989 & -1,64414 & 0,070718 & 0,246086 & -1,157813 \\ 0,06807 & -0,69624 & 0,15889 & -0,156803 & -0,16172 & 0,0292841 & 0,22837 & 0,16266 & -1,66095 & 1,084265 \\ 0,50198 & -0,118737 & 0,497073 & -0,505973 & -0,16172 & 1,347180 & -0,207591 & 0,478893 & -2,01071 & 0,12759 \end{bmatrix}$$

$$b_{cs} = [0,343028]$$

*Edgar Castillo, Luis Mora, Eduardo Gutiérrez, Osmel Martínez, Paúl Tafur, André Soria, Ángelo Villavicencio, Gabriela Torres, Raúl Baldeón*

$$W_{cs} = [-0,63373 \quad -1,256901 \quad -0,62935 \quad 0,63727 \quad 0,61739 \quad -1,86319 \quad -1,27852 \quad -0,61289 \quad -1,412808 \quad -1,52850]$$

El porcentaje de ajuste de esta RNA es  $R^2 = 93,6677\%$  y el error es  $S = 373,08$ .

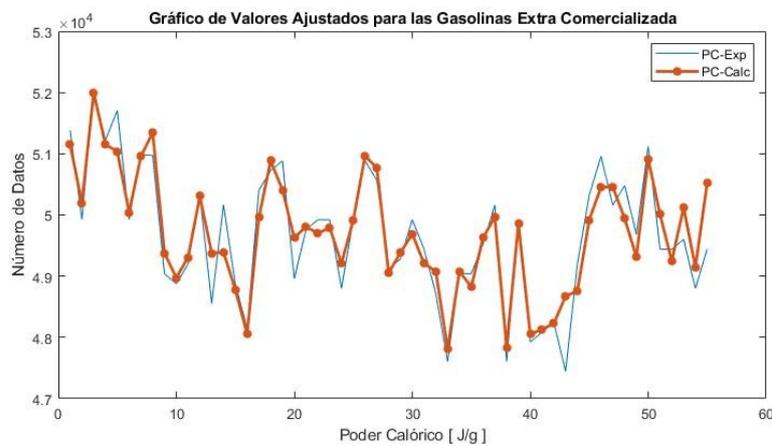


Figura 4. Ajuste de la RNA desarrollada para las gasolinas Extra Comercializada

#### Gasolinas Ecopaís Comercializada:

$$b_{co} = [-0,0704 \quad 0,0708 \quad -0,2354 \quad -0,07028 \quad 0,18786 \quad -0,42415 \quad 0,07035 \quad 0,73712 \quad -0,07056 \quad -0,55896]^t$$

$$W_{co} = \begin{bmatrix} -0,09740 & 0,09786 & -0,57611 & -0,0972 & 0,47572 & 1,073834 & 0,09729 & 0,013868 & 0,09751 & -0,70496 \\ -0,06335 & 0,06355 & -1,64549 & -0,0632 & 0,23923 & -0,11028 & 0,06331 & -0,13736 & -0,063406 & 1,440184 \\ -0,13335 & 0,13382 & 0,1267 & -0,13317 & -0,27427 & -0,95926 & 0,13325 & 0,974719 & -0,13347 & -0,45561 \\ 0,07544 & -0,07559 & 1,10661 & 0,07538 & -2,0353 & 0,983302 & -0,07541 & -0,12382 & 0,075483 & 0,7511 \\ 0,2550 & -0,25585 & 1,04185 & 0,25473 & 0,15831 & 1,412991 & -0,25486 & -0,79366 & 0,2552 & -1,0099 \end{bmatrix}$$

$$b_{cs} = [0,0879965]$$

$$W_{cs} = [-0,33842 \quad 0,339597 \quad 1,57360 \quad -0,33796 \quad 1,70439 \quad 1,31804 \quad 0,338157 \quad 1,49132 \quad -0,33871 \quad 1,757850]$$

El porcentaje de ajuste de esta RNA es  $R^2 = 94,3131\%$  y el error es  $S = 263,07$ .

Para analizar la bondad de ajuste de las RNA elaboradas se generan los gráficos de ajustes de los valores estimados y los valores predichos para el 100 % de los datos de entrada. En las

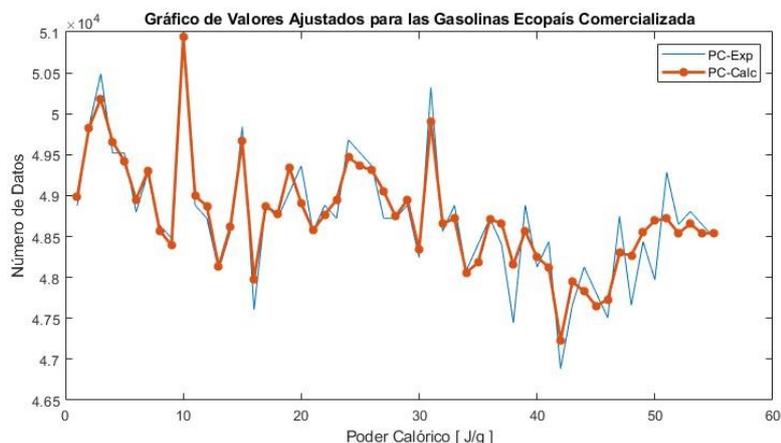


Figura 5. Ajuste de la RNA desarrollada para las gasolinas Ecopaís Comercializada

figuras 3, 4 y 5 se muestran los gráficos correspondientes a cada uno de los valores de poder calórico predicho mediante las redes desarrolladas para las gasolinas estudiadas.

Como se puede observar en estas figuras, el ajuste mostrado por las RNA en cada uno de los casos es satisfactorio, donde se muestran coeficientes elevados de ajustes a los datos experimentales por encima del 90 % por lo cual se consideran válidos para la realización de predicciones sobre el poder calórico de las gasolinas sin necesidad de realizar los costosos experimentos necesarios para ello, Aunque es válido destacar la necesidad de reentrenamiento periódico de las redes desarrolladas incorporando valores obtenidos mediante la realización de experimentos pasivos.

## CONCLUSIONES

La realización de mediciones experimentales del poder calórico de muestras obtenidas de las gasolinas comercializadas y las muestras de análisis históricos facilitados por la ARCH, permitieron la obtención de un número de datos suficientes para la realización del análisis requerido para el desarrollo del modelado para la predicción del poder calórico de estos combustibles y la definición de los parámetros de calidad como variables de entradas en este proceso.

*Edgar Castillo, Luis Mora, Eduardo Gutiérrez, Osmel Martínez, Paúl Tafur, André Soria, Ángelo Villavicencio, Gabriela Torres, Raúl Baldeón*

La aplicación de las herramientas modernas de análisis y modelado implementadas en Matlab permitieron el desarrollo de modelos de redes neuronales artificiales de tipo feed-forward con una capa oculta con diez neuronas para las que se identificaron los coeficientes bias (b) y los coeficientes de pesos de los nodos (w) para la determinación de poder calórico por cada una de las gasolinas estudiadas en esta investigación mediante el entrenamiento con el 70 % de los datos de entrada.

Las redes neuronales artificiales obtenidas para cada tipo de gasolina, permiten la predicción del poder calórico de estos combustibles con un error máximo de 373,08 J/g y un ajuste superior al 93 %, lo cual permite realizar una adecuada predicción sobre el valor de esta propiedad, como alternativa a la carencia de procedimientos analíticos de alta precisión para su determinación.

## **AGRADECIMIENTO**

Se agradece la cooperación de la Agencia de Control y Regulación Hidrocarburífera (ARCH) del Ecuador, por la apertura y el haber compartido con los fines de este estudio los datos históricos, sin los cuales no habría sido posible la verificación de los mismos con los modelos por RNA.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero. 2019. Estadísticas hidrocarburíferas del Ecuador. <<http://www.controlhidrocarburos.gob.ec/estadisticas-hidrocarburiferas-del-ecuador/>>[Consulta: 11 – 10 – 2018]

Ávila, D., y Ayala, J. 2013. *Estudio del comportamiento de motores a gasolina respecto a la variación del octanaje*. (Tesis de Maestría). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Castillo, P.; Mendoza, A. y Caballero, P. 2012. «Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol». Ingeniería, investigación y tecnología. ISSN 1405 – 7743. Vol.13 no.3.

*Análisis, Estudio y Modelamiento Matemático para la Caracterización Energética de las Gasolinas Comerciales en Función de los Parámetros de Calidad referentes a las Normas ASTM*

- Casanova, J.; Fonseca, N. y Agudo, D. 2018. *Análisis de la combustión híbrida de metano y butanol en un motor de combustión interna*. XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica-Madrid. ISSN: 0212 – 5072. pp 706 – 701.
- Chuliquinga, J. y Ruiz, C. 2016. *Análisis del potencial energético del metanol y etanol como aditivo orgánico de la gasolina extra, para su utilización en el motor de combustión ciclo otto en proporciones del 5 %, 10 % y 15 %*. (Tesis de Pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Latacunga, Ecuador.
- Druet, L. y Vera P. 2017. *Evaluación técnica y optimización del uso de aditivos comerciales para elevar el octanaje de las gasolinas en el ecuador*. Tesis de pregrado. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.
- INEC. 2016. <<http://www.ecuadorencifras.gob.ec/search/parque+automotor/>>[Consulta 27 – 05 – 19]
- Parada, E. y Villalba, R. 2016. *Evaluar el comportamiento del combustible Ecopaís a una altura mayor de 2500 msnm y su comparativa con el combustible Extra y Eio*. Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Riobamba, Ecuador
- Poveda, R.; Merizalde, P.; Calvopiña, M.; Pareja, C.; Carrillo, R.; Ordoñez, C. y otros. 2013. *El Petróleo en el Ecuador - La Nueva Era Petrolera* (1ª Edición ed.). Ecuador: Manthra Comunicación Integral y Producción Editorial.
- Quimbita, A. y Guallichico, E. 2017. *Determinación del potencial energético y mecánico del motor Mazda f2 al utilizar los tipos de gasolina comercial empleados en el ecuador*. Tesis de Pregrado. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador.
- Raviteja, S. y Kumar, G.N. 2015, «Effect of hydrogen addition on the performance and emission parameters of an SI engine fueled with butanol blends at stoichiometric conditions». *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 – 30, 9563 – 9569. <[https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015,05,171](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.171)>
- Xiongbo, D. et al. 2018. «Performance, combustion and knock assessment of a high compression ratio and leanburn heavy-duty spark-ignition engine fuelled with n-butane and liquefied methane gas blend». *Energy*. 256 – 268.

*Edgar Castillo, Luis Mora, Eduardo Gutiérrez, Osmel Martínez, Paúl Tafur, André Soria, Ángelo Villavicencio, Gabriela Torres, Raúl Baldeón*

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218304122>> [Consulta 20 – 05 – 19]

Zhang, P.; et al. 2018. «Effects of Methane Addition on Exhaust Gas Emissions and Combustion Efficiency of the Premixed n-Heptane/Air Combustion». *Energy Fuels*, 32(3), 3900 – 3907. DOI:<10.1021/acs.energyfuels.7bo3469>

Fecha de recepción: 07/06/2019

Fecha de aceptación: 24/06/2019

**Correspondencia**

Eduardo Roberto Gutiérrez Gualotuña

ergutierrez@espe.edu.ec