

Revista Electrónica Nova Scientia

Modelo estadístico que permite observar el impacto de los factores que inciden en el rendimiento de combustible

Statistical model allowing observe the impact of factors affecting performance fuel

Rosa Amelia Alcántar Ruiz¹, Francisco Edmundo Treviño Treviño² y José Luis Martínez Flores³

¹Doctorado, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

²Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León

³Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Puebla

México

Rosa Amelia Alcántar Ruiz. E-mail: rossy_alcantar@yahoo.com.mx

Resumen

El presente trabajo propone un modelo estadístico de regresión lineal múltiple para la toma de decisiones sobre el rendimiento de combustible con aplicación a la industria del autotransporte en México considerando los factores con mayor incidencia en el consumo. El modelo aplicado tiene significancia estadística, así como las variables explicativas: tipo de ruta, antigüedad y cantidad de diésel consumido en baja, esto con un nivel de confianza del 95%, lográndose explicar un 94% del efecto de interés modelado. La contribución fundamental de este artículo es proponer un modelo estadístico como una nueva herramienta de gestión para los tomadores de decisiones del sector, en relación al establecimiento de estándares de combustible y la administración en general de este insumo, puesto que fue determinado a partir de las condiciones operativas de la industria del transporte y no bajo condiciones experimentales (difíciles de replicar) empleadas por el fabricante del automotor.

Palabras Clave: Rendimiento de combustible, Regresión Lineal múltiple, transporte de carga, modelo

Recepción: 12-09-2014

Aceptación: 19-03-2015

Abstract

This paper proposes a statistical multiple linear regression model for decision-making on fuel efficiency with application to the motor carrier industry in Mexico considering the factors with the greatest impact on consumption. The model has applied statistical significance, and the explanatory variables: route type, age and amount of diesel consumed in low this with a significance of 5%, achieving explain 94% of the effect of modeling interest. The main contribution of this paper is a statistical model as a new management tool for decision makers in the sector in relation to the establishment of standards for fuel and general administration of this

input, as was determined from the conditions operating in the transportation industry and not under experimental conditions (difficult to replicate) used by automotive manufacturers.

Keywords: Fuel Economy, Multiple Linear Regression, Freight, Model

Introducción

Resulta evidente que el transporte de mercancías es uno de los eslabones clave que integran la cadena de suministro. El impacto económico de esta rama de servicios en México queda de manifiesto con las estadísticas que muestran que el 7.0% del Producto Interno Bruto está ligado a éste (INEGI, 2011).

El gasto en combustible en la industria del transporte llega a alcanzar hasta un 32.5% del costo variable operativo por kilómetro (Jaime, Klein y Newel, 2012). Ante esta panorámica los dueños o Directores de estas empresas le dedican especial atención a la administración del mismo, con el objetivo de asegurar la eficiencia en su consumo.

El estándar usualmente considerado por los tomadores de decisiones en las empresas de autotransporte es el que declara la compañía productora del vehículo y se desconoce bajo qué condiciones es determinado, asimismo no se tiene establecida una periodicidad para su actualización (Fuentes, 2002). Esto repercute en que dicho estándar no sea alcanzado en la gran mayoría de los viajes ejecutados en las empresas de transporte en México, debido a la diferencia entre dichas condiciones y la naturaleza del entorno operativo de las empresas mexicanas de transporte: tipo de carga, tipo de ruta, nivel de competencia de manejo técnico económico por parte del operador, entre otras.

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, el presente trabajo muestra el desarrollo de un modelo estadístico de regresión lineal múltiple para la toma de decisiones sobre el rendimiento de combustible, considerando los factores con mayor incidencia en el consumo (peso transportado, litros de combustible consumido en baja y antigüedad) con aplicación en la industria transportista mexicana.

Revisión de la literatura

La producción de investigaciones orientadas a la predicción y optimización del consumo de combustible de vehículos utilizados para el transporte de mercancías no es un tema que haya sido

estudiado abundantemente, además, se puede observar que aquellas relacionadas con la obtención de modelos se excluyen variables explicativas importantes como son: las rutas de viaje con curvas, pendientes, vehículos con remolque (Pérez et al., 2010), así como también se excluyen la antigüedad del vehículo, las técnicas de conducción y curvatura del camino (Posada, 2012). Así mismo, se han encontrado desviaciones entre las predicciones de algunos de esos modelos tipo HDM (*Highway Development and Management*) y los resultados reales (Altamira, 2003). Por la complejidad en la que se encuentra el objeto de estudio, los modelos desarrollados tienden a considerar una sola variable explicativa, y se obtienen bajo condiciones controladas, que difícilmente pueden mantenerse en la operación de una empresa transportista.

A continuación se resume lo más relevante como resultado de la revisión bibliográfica:

- Nivel técnico-económico de competencia del operador en la conducción del vehículo. De acuerdo a una investigación realizada empleando diseño de experimentos, se demostró que mejoraba un 22.5% el rendimiento operando el motor solo un 7% de tiempo sin actividad alguna (mínima), maximizando el tiempo en velocidad crucero (velocidad constante) en 24% y el 20% del tiempo en el máximo cambio. (Correa, Cogollo y Salazar, 2010)
- Características mecánicas de la unidad. La selección del tren motriz (motor, trasmisión, diferencial, llantas, y embrague) en las unidades de autotransporte incide de manera importante en el desempeño de la misma y por tanto en la economía del combustible. (Rafael, Cervantes y Lozano, 2010).
- Condiciones de operación. Este rubro concierne, a tipo de ruta, dimensiones de la carga transportada, políticas de mantenimiento, tiempo de ciclo del servicio y antigüedad de la flota. (Rafael, Sánchez y Guzmán, 1995).
- Condiciones ambientales. Factores como el clima y flujo de tránsito en la carretera inciden en el rendimiento de combustible. A manera de ejemplo, se tiene determinado que el viento en contra aumenta el consumo por efectos aerodinámicos hasta un 8% con viento de 18 km/h y hasta un 18% con viento de 36 km/h en un vehículo con deflectores en cabina. Una bajada de temperatura atmosférica de unos 10º C aumenta el consumo alrededor de 4 %. (IDEA, 2005).

Con base a lo anterior el modelo que se propone es pertinente, ya que considera más de dos variables explicativas y bajo el ambiente operativo de una empresa de transporte en México.

A continuación se describe el marco teórico de las variables a considerarse dentro del modelo estadístico teórico propuesto:

Medición del Consumo de combustible en el transporte de Carga

Las empresas transportistas dan un seguimiento estrecho al consumo de combustible de cada una de las unidades que integran la flota. El procedimiento para medir el consumo de combustible consiste en monitorear a través de registros manuales o automatizados (reportes emitidos por la computadora del motor) el consumo de litros de combustibles efectuados por viaje y los kilómetros recorridos. La razón (división matemática) de estos últimos entre los litros gastados, da origen al factor de rendimiento de combustible.

Para este indicador se sugiere considerar los siguientes puntos (ACHEE, 2014):

- El rendimiento es altamente dependiente del tipo de vehículo, por lo que los promedios para flotas completas a menudo no acusan situaciones que conviene entender detalladamente. Se recomienda hacer seguimiento por grupos de vehículos de características similares, por ejemplo marca, potencia de motor y antigüedad.
- Las características de la operación ciertamente impactan consumos y rendimientos de combustible de manera que, aún para grupos de vehículos de similares características, estos indicadores solo son válidamente comparables cuando transportan cargas razonablemente equivalentes en peso sobre rutas similares, con proporciones parecidas de movimientos con carga y sin ella.
- Es altamente recomendable que los reportes de litros de combustible consumidos sean registrados por viaje y validados con documentos emitidos por las estaciones de carga

internas y/o externas. Además, deben ser conciliados contra reportes periódicos de las estaciones de carga.

- En muchas empresas se ha demostrado que la mejor manera de asegurar precisión en los reportes de los litros de combustible ingresados a los vehículos es establecer la práctica de “tanque lleno”. Los vehículos siempre deben iniciar sus viajes con los estanques llenos y llenarlos nuevamente al momento de hacer sus rendiciones.

Generalmente este índice, es una medida de desempeño operativa con impacto en ámbitos distintos de la administración, tales como, evaluar la rentabilidad del viaje y evaluar el desempeño del operador.

El estándar de referencia para evaluar el consumo de combustible en las empresas transportistas se hace a través de las siguientes opciones:

- Considerar el estándar propuesto por el fabricante de la unidad motriz, el cual es determinado bajo condiciones experimentales controladas, que son difíciles de replicar en el ámbito operativo de una empresa transportista, además las normas utilizadas en la evaluación son propias del país de procedencia del vehículo y no se tiene una periodicidad establecida para su actualización (Fuentes J, 2002).
- Otro procedimiento sugerido para establecer un estándar del rendimiento de combustible es el análisis de los históricos de los factores de rendimiento de combustible, fijándose como valores objetivos de desempeño para todas las unidades que integran la flota (Rafael, 2002).
- En algunas compañía se llevan a cabo los “viajes prueba”, que consisten en mandar a una persona capacitada en técnicas de conducción económica con un operador para que supervise un viaje en cierta ruta específica. Se inicia el viaje con tanques llenos y al llegar al destino se vuelve a cargar de combustible la unidad determinando los litros consumidos de diésel y el kilometraje recorrido. A partir de ese viaje se suele obtener el estándar para

esa unidad, y en algunas compañías se fija como parámetro para el resto de las unidades de la flota que realicen el viaje por esa misma ruta.

- Otro procedimiento consiste en sólo cotejar el rendimiento de combustible calculado físicamente con el que se obtiene por “reseteo” de la computadora del motor. Cabe señalar que el reseteo consiste en descargar la información de la computadora del motor con información y métricos generados durante el viaje.

Ruta de Operación

El impacto de la carga y magnitud de la pendiente del camino por donde transitan las unidades destinadas al autotransporte, resultaron ser factores con alto impacto para modelar el consumo de combustible en una investigación realizada en Colombia, en este investigación se aplicó el diseño de experimentos y el análisis de regresión múltiple. (Posada, 2012).

La Marcha en ralentí (Diésel consumido en baja)

La marcha en ralentí (el motor trabajando y el vehículo detenido) desperdicia combustible y dinero. Un tractor camión en ralentí consume más de 4.5 litros de combustible en una hora. Los largos periodos de marcha en ralentí dañan el motor. Los fabricantes recomiendan dejar operando el motor sólo tres minutos antes de apagarlo, para bajar su temperatura. Mantener un motor diésel frío en marcha ralentí durante una hora le produce tanto desgaste como el equivalente al manejar el vehículo por 4 o 5 horas a una velocidad de 90 km/hr (Treatise, 2005).

Antigüedad de la flota

De acuerdo a una investigación realizada por el Instituto Mexicano del Transporte (Rafael, 2004), se obtuvieron datos reales de flotillas de empresas mexicanas de transporte de carga, concluyéndose que un vehículo nuevo por lo general recorre entre 10 000 y 35 000 km anuales, más que las unidades con mayor edad; además se observa lo siguiente:

1. El ahorro de combustible varía entre 8 y 12% del gasto anual de combustibles por vehículo (aprox. 5 000 litros de diésel por año).

2. El ahorro en mantenimiento varía entre el 32 y el 40% del monto anual. Esto representa el mayor beneficio observado.
3. La disminución de los días de inmovilización por vehículo.

Sin embargo estos beneficios se reducen con la edad y el uso del vehículo, ya que una unidad antigua no resiste ningún costo de depreciación y amortización de deuda, en comparación con una nueva.

De acuerdo con la experiencia de empresas europeas, por cada peso ahorrado en términos de combustible se logra un ahorro de hasta cuatro pesos en los demás renglones mencionados. Sin considerar la disminución del margen de utilidad cuando se tiene la unidad inmovilizada, en lugar de transportar flete.

Modelo teórico propuesto

El presente trabajo se sustenta en la aplicación de un método estadístico para modelar y posteriormente pronosticar el comportamiento de un efecto de interés (rendimiento de combustible) en función de varios factores significativos tanto cuantitativos como cualitativos (peso, tipo de ruta, antigüedad de la unidad, diésel consumido en “baja”): la regresión lineal múltiple (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

$$(1) \mathbf{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon$$

X_1 =Tipo de ruta de operación

X_2 =Antigüedad de la Unidad

X_3 =Diésel consumido en baja

Un modelo de regresión lineal múltiple es factible de obtenerse a través de experimentos planeados, observaciones de fenómenos no controlados o de registros históricos, siendo el primer esquema, el caso de aplicación al que se refiere esta investigación.

Materiales y métodos

El modelo propuesto fue aplicado en una empresa transportista mexicana clasificada como grande dentro del sector de acuerdo al criterio de ventas, con una flotilla integrada por 176 unidades. En el cuadro 1, se presenta la caracterización de la flota vehicular.

Cuadro 1. Características mecánicas de las unidades de la empresa transportista

Modelo	Paso diferencial	Motor
KW-Modelo T800	4.30	Caterpillar C-15
International PROSTAR	4.56	Cummins ISX

Fuente: Elaboración propia (2013).

La compañía ofrece el servicio de transporte de carga general (Productos diversos de acero, alimentos no perecederos, productos diversos de consumo, entre otra diversidad de artículos).

La oferta de servicio es muy flexible en cuanto a rutas (origen-destino), tales como: Monterrey-Cd de México; México-Saltillo, Monterrey-Yucatán, entre diversas combinaciones de origen-destino a lo largo de la Republica Mexicana.

Se tomó una muestra de 110 viajes en el periodo de Enero a Septiembre del 2013.

Variable respuesta (Y)

Para el estudio, el rendimiento de combustible de una unidad de autotransporte constituye la variable respuesta, medido como la razón entre el kilometraje recorrido y los litros de diésel consumido.

Variables Explicativas (X's)

En el cuadro 2 se presentan las variables explicativas para el efecto de interés y su medición.

Cuadro 2 Descripción de las variables independientes del modelo

Variable (X)	Tipo	Medición
Tipo de ruta	Discreta	0= Mayor kilometraje entre el origen y destino del viaje sin pendientes y/o curvas. 1=Mayor kilometraje entre el origen y destino con pendiente y curvas.
Antigüedad	Continua	Años en servicio dentro de la flota
Litros de diésel consumidos en baja (Ralentín)	Continua	Litros de combustible que la unidad consume prendida sin estar en movimiento.

Fuente: Elaboración propia (2013).

Aplicación del Modelo de Regresión Lineal Múltiple

La empresa transportista proporcionó una base de datos con información de los viajes tomados como muestra, la cual fue validada a través de la consulta de los registros de la compañía como reportes de pruebas de manejo, fichas técnicas de las unidades, historial del recorrido de los viajes, bitácoras de mantenimiento, expedientes de personal y hojas de reseteo de la computadora del motor.

Cabe señalar que para este modelo no fueron considerados como variables explicativas, factores ligados al operador, calidad de combustible, tráfico y condiciones ambientales.

En el cuadro 3, se muestra un fragmento del plan experimental generado para el propósito de esta investigación.

Cuadro 3 Plan experimental para la obtención del modelo de rendimiento de combustible

UNIDAD	ANTIGÜEDAD	RENDIMIENTO	TIPO DE RUTA	DIESEL CONSUMIDO EN BAJA
141	1	1.78959811	1	18
210	3	1.50347747	1	24
53	2	1.77004049	1	30.5
76	1	1.54038997	1	10
177	5	3.01048951	0	30
183	2	1.65147882	1	43
NM 01	3	1.70927318	0	5
160	3	2.04155125	0	8
38	4	1.378827	1	27

Fuente: Elaboración propia (2013).

Resultados

A continuación se presenta el modelo de regresión lineal múltiple, el cual fue obtenido a través del software estadístico minitab:

$$(2) \text{ RENDIMIENTO} = 2.19 - 0.0181 X_1 - 0.00179 X_2 - 0.606 X_3$$

Donde:

X1= Antigüedad

X2= Diésel consumido en baja

X3= Tipo de ruta

Este modelo bajo niveles óptimos para las variables independientes consideradas, indica que el máximo rendimiento esperado es de 2.19 km por litro, para un viaje con una unidad nueva, un tipo de ruta con mayor kilometraje sin pendiente y/o curva y cero litros de diésel consumido en baja.

El cuadro 5, muestra el ANOVA del modelo, observándose que todos los factores considerados son significativos, así como el propio modelo, esto con un nivel de confianza del 95%.

En cuanto al coeficiente ajustado de regresión lineal múltiple se puede observar que el conjunto de las variables independientes explican 94% del consumo de combustible o rendimiento.

Cuadro 4 ANOVA y Resultados de pruebas de hipótesis del modelo de regresión

Variable	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constante	2.18600	0.02236	97.77	0.000	
Antigüedad	-0.018118	0.003464	-5.23	0.000	1.0
Diesel en baja	-0.0017938	0.0006381	-2.81	0.006	1.8
Tipo de ruta	-0.60642	0.02140	-28.34	0.000	1.7

S = 0.07520 R-Sq = 93.8% R-Sq(adj) = 93.7%

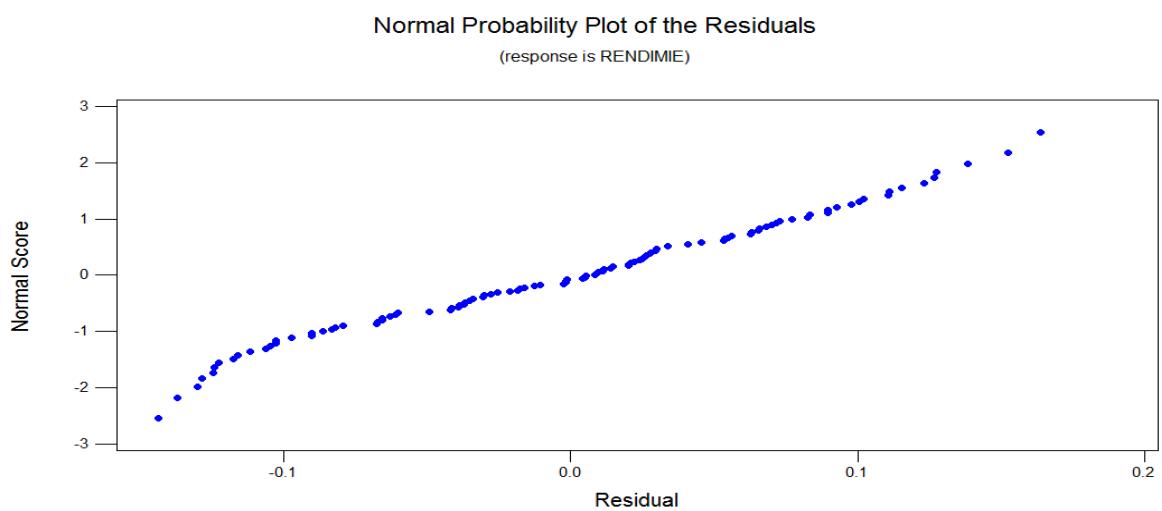
Análisis de Varianza

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	3	9.1238	3.0413	537.85	0.000
Error Residual	106	0.5994	0.0057		
Total	109	9.7232			

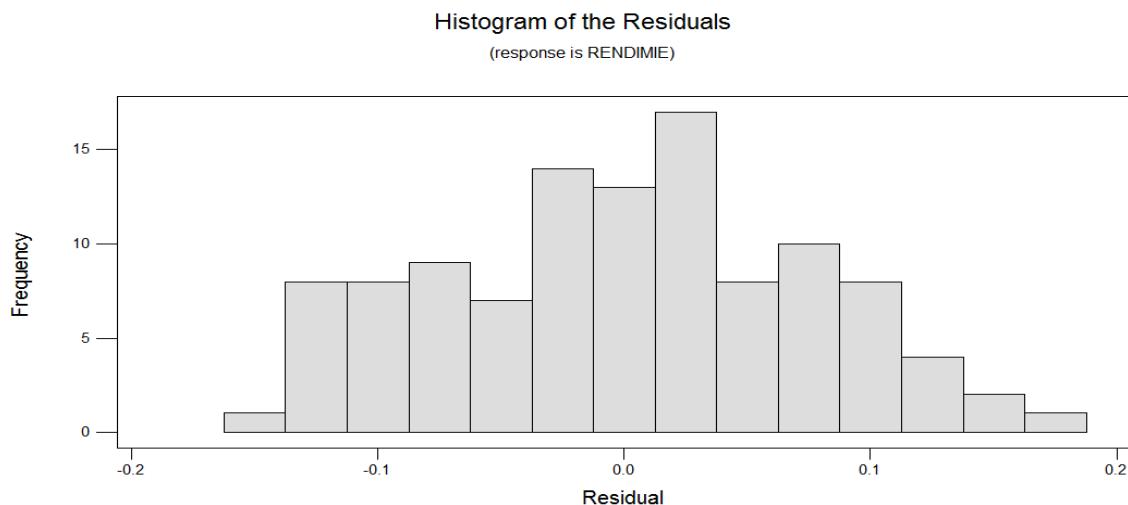
Fuente: Elaboración propia (2013)

Una vez que se obtuvo el modelo, se procedió a validar los supuestos, para asegurar que los estimadores sean los óptimos, a continuación se presenta la evidencia del cumplimiento en las figuras 1, 2, 3 y 4.

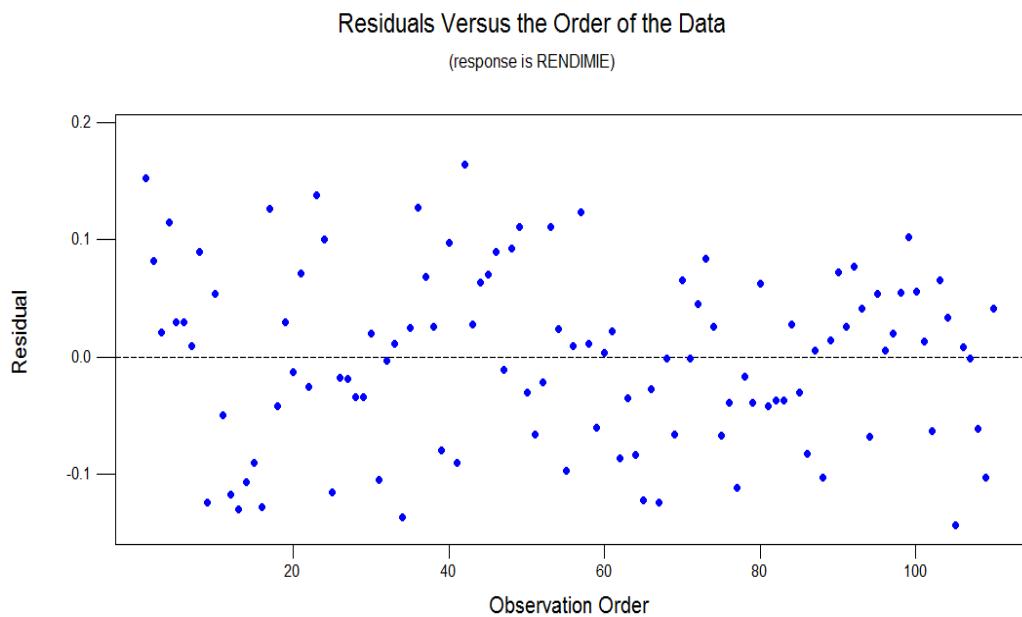
Gráfico 1. Gráfica de Probabilidad Normal para los residuos



Fuente: Elaboración propia con minitab ® (2013)

Gráfico 2. Histograma de los residuales

Fuente: Elaboración propia con minitab ® (2013)

Gráfico 3. Residuos Vs Orden de datos

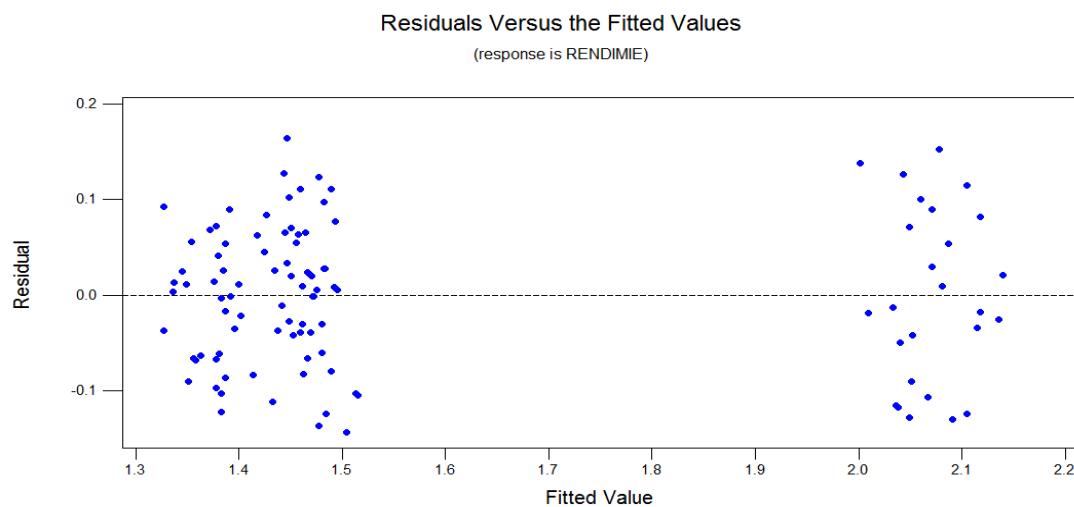
Fuente: Elaboración propia con minitab ® (2013)

El supuesto de normalidad se comprueba con la gráfica de probabilidad normal de los residuos (Gráfico 1) y el histograma de residuos (Gráfico. 2). En la gráfica de residuos contra pronóstico (Gráfico 4), se nota que tienen una varianza aproximadamente constante.

En la gráfica de residuos frente a orden de ejecución del experimento (Gráfico 4) se demuestra la independencia de éstos, ya que no existe un patrón de comportamiento específico. Se presume que no existe auto correlación entre las variables de acuerdo al índice obtenido en la prueba de Durbin-Watson con valor de 1.74 (ver cuadro 3) cercano al valor de 2.

La no multicoliniedad se demuestra en los valores obtenidos de los factores de inflación de varianza para cada factor (Variable explicativa), los cuales fueron menores a 10. Ver cuadro 3

Gráfica 4. Residuos Vs Orden de datos



Conclusiones

De acuerdo a los resultados se concluye que el modelo propuesto para la toma de decisiones empleando regresión lineal múltiple sobre el rendimiento de combustible aplicado en la empresa transportista mexicana es significativo, así como las variables explicativas: tipo de ruta, antigüedad y cantidad de diésel consumido en baja, esto con un nivel de confianza del 95%.

En conjunto estas variables explican un 94% del efecto estudiado a través del modelo. Las pruebas a las cuales fueron sometidos los datos denotan que no existe evidencia suficiente para presumir un incumplimiento en cuanto a la linealidad, heterocedasticidad y normalidad.

Si las variables explicativas tomaran el mínimo valor posible (cero), el rendimiento de combustible sería el más alto con 2.19 Km/litro de diésel. El este factor de rendimiento se queda por debajo del que refiere el fabricante, el cual es de 3.0 Km/litro de diésel.

El modelo resultante fue entregado a la compañía en una hoja de Excel como una especie de simulador, que les permitirá estar determinando de manera dinámica y particularizada el desempeño esperado para niveles esperados de las variables independientes en determinado viaje.

La contribución fundamental de la investigación estriba en una nueva herramienta de gestión con sustento científico para los tomadores de decisiones del sector, en relación al establecimiento de estándares de combustible y la administración en general de este insumo, considerando las condiciones operativas de la industria del transporte y no bajo condiciones experimentales (difíciles de replicar) empleadas por el fabricante del automotor; aunado a lo anterior este modelo utiliza un sistema de medición para las variables explicativas y efecto de interés, 100% práctico y de fácil manejo para los usuarios(tomadores de decisión en las empresas de transporte).

Referencias

ACHEE. (2014). Guía unidad de eficiencia energética. Recuperado el 01 de Julio del 2014 de http://www.cargatee.cl/documentos/G1_Unidad_EE.pdf

ALTAMIRA, Aníbal. Determinación del consumo de combustible de vehículos pesados sobre distintos tipos de pavimento. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería, 2003. 216 p.

Cummins Engine Company (2008). Ficha técnica motor Cummins ISX 475.ed. México D.F., McGraw-Hill, 405 p.

Correa A., Cogollo J., Salazar J. (2010). Evaluación del efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible en vehículos de transporte de carga pesada usando diseño de experimentos. Producción+Limpia. Vol.5, (21) ,96-112.

Fuentes J. (2002) Selección, Evaluación y Renovación del Parque Vehicular, UCF, p. 190. Golato, R. (2011). El Consumo de Combustible y Energía en el Transporte. Extensión. Vol. 17, no. 2, p. 245–254.

González, R. (2003) Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte. Ingeniería Investigación y Tecnología. México. (VI) 56 –63.

Gutiérrez., De la Vara R. (2008).Análisis y Diseño de Experimentos. (2da edición). México: McGraw-Hill.

Hernández, R. (2003). Metodología de la Investigación (5ta). México: McGraw-Hill.

IDEA. (2005). Manual de conducción Eficiente para conductores de vehículos industriales. Recuperado el 10 de Julio del 2011 de http://www.uned.es/experto-profesional-conduccion-racional/manual_conduccion_industriales.pdf

Jaime E., Klein H., Newel R. (2012). Los retos de la competitividad en México. Una agenda de reformas inmediatas. Recuperado el 02 de Agosto del 2012, http://www.la.fnstfreiheit.org/uploads/1198/NaumanCompetitividad_final.pdf

Montgomery, Douglas C. (2005). Design and analysis of experiments. (5ed). New York: John Wiley & Sons.

Pérez R., Fuentes J., Cogollo J., Toledo A. (2010). Evaluación de la eficiencia energética de vehículos pesados en el ciclo de movimiento básico modificado. Ingeniería Mecánica. Vol.13, (1) ,49-58.

Posada, J. (2012). Efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones. (Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/8440/>

Rafael M.M, Manuel F.S., Guzmán R.C.(1995), Manual de Conducción Técnica de Vehículos Automotores Diesel, Publicación Técnica No. 70 Instituto Mexicano del Transporte.

Rafael M. (2004), Métodos para la renovación de vehículos de autotransporte de servicio pesado. Publicación Técnica No. 260 Instituto Mexicano del Transporte.

Rafael M. (2002), Diagnósticos Energéticos en Empresas de Autotransporte, Dos casos de Aplicación. Publicación Técnica No. 171 Instituto Mexicano del Transporte.

Rafael, M. Cervantes J., Lozano A. (2010), Eficiencia Energética del tren motriz de vehículos pesados con reducción de co2, Memorias del XVI congreso internacional anual de la SOMIM.

SCT, (2011). Estadística Básica del Autotransporte Federal. Secretaría de Comunicaciones y Transporte, México, D.F.

TREATISE. (2005). La conducción eficiente. Recuperado el 20 de Julio del 2013 de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10297_TREATISE_ConduccionEficiente_A2005_A_f3817bad.pdf