



Universidad Popular Autónoma del Estado de
Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados
Investigación y Consultoría

Departamento de Ingeniería

Doctorado en Logística y Dirección de la
Cadena de Suministro

**Diseño de un Modelo Estadístico sobre el rendimiento de combustible
con Aplicación en la industria del transporte en México**

Tesis que para obtener el grado de Doctor en Logística y Dirección de
la Cadena de Suministro

Presenta

Rosa Amelia Alcántar Ruiz

Puebla, México

Mayo 2015



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Popular Autónoma del Estado de
Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados
Investigación y Consultoría

Departamento de Ingeniería

Doctorado en Logística y Dirección de la
Cadena de Suministro

**Diseño de un Modelo Estadístico sobre el rendimiento de
combustible con Aplicación en la industria del transporte en
México**

Se aprueba Tesis:

Comité Doctoral

Dr. Francisco Edmundo Treviño Treviño
Director de Tesis

Dr. José Luis Martínez Flores
Asesor

Dr. Elías Olivares Benítez
Asesor

Puebla, México

Mayo 2015

RESUMEN

El producto de esta investigación es un modelo estadístico para la toma de decisiones sobre el rendimiento de combustible en las empresas de autotransporte con aplicación al entorno operativo de este sector en México, el cual se fundamenta en técnicas cuantitativas: Regresión Lineal Múltiple y Diseño de experimentos factoriales.

Esta última permitió valorar las variables con mayor impacto en el rendimiento, y la ejecución de la primera con datos históricos produjo el modelo estadístico, el cual fue probado en una empresa transportista mexicana, logrando probar la significancia estadística y explicar un 94% del interés modelado.

ABSTRACT

The product of this research is a statistical model for decision-making on fuel efficiency in motor carriers with application to the operating environment of this sector in Mexico, which is based on quantitative techniques: Multiple Linear Regression and Factorial Design of factorial Experiments.

The latter allowed assessing the variables with the greatest impact on performance, and implementation of the first historical data produced the statistical model, which was validated by applying it to a Mexican transportation company making test for statistical significance and explain a 94% interest modeling.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO 1. PROPÓSITO Y ORGANIZACIÓN.....	10
1.1 Planteamiento del problema.....	11
1.2 Propósito de la investigación.....	12
1.3 Objetivo general.....	13
1.4 Objetivos específicos.....	13
1.5 Preguntas de investigación.....	14
1.6 Justificación de la investigación.....	14
1.7 Alcances y limitaciones.....	15
1.8 Resultados esperados.....	16
1.9 Organización de la tesis.....	17
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 Procedimientos para determinar el rendimiento de combustible.....	19
2.2 Efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible.....	20
2.3 Efecto de las características mecánicas en el consumo de combustible.....	21

2.4 Efecto de las condiciones de operación en el consumo de combustible.....	23
2.5 Diseño de experimentos factoriales.....	26
2.6 Regresión Lineal Múltiple.....	27
CAPITULO 3 STATISTICAL MODEL PREDICTING FREIGHT TRANSPORT FUEL EFFICIENCY.	30
Abstract.....	30
Introduction.....	31
Literature review.....	31
Proposed conceptual model.....	32
Methodology.....	33
Results.....	33
Findings.....	35
References.....	35
CAPITULO 4. MODELO ESTADISTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE EN EMPRESAS TRANSPORTISTAS	37
Resumen.....	37
Introducción.....	40
Revisión de la literatura.....	41

Metodología propuesta.....	42
Obtención del modelo a partir de los datos de una empresa transportista en México.....	44
Conclusiones.....	56
Referencias.....	57
CAPITULO 5. MODELO ESTADÍSTICO QUE PERMITE OBSERVAR EL IMPACTO DE LOS FACTORES QUE INCIDEN EN EL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE	59
Resumen.....	59
Introducción.....	61
Revisión literaria.....	62
Modelo teórico propuesto.....	67
Materiales y Métodos.....	69
Resultados.....	71
Conclusiones.....	75
Referencias.....	79
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN...	80
REFERENCIAS.....	84
ANEXO A. CONSTANCIA DE PRESENTACION.....	87
ANEXO B. ACEPTACION PARA PUBLICACIÓN.....	88

INTRODUCCIÓN

El transporte es un elemento clave dentro de la cadena de suministro, ya que a través del mismo es posible poner a la disposición de los usuarios diversos, insumos o bienes terminados, incidiendo de manera importante en el progreso de las naciones.

En la actualidad, el transporte de carga pesada en México, constituye una especial área de oportunidad, por la ventaja competitiva que representa su ubicación geográfica y los tiempos de tránsito respecto a su principal socio comercial: Estados Unidos. De acuerdo al Instituto Mexicano de Competitividad el costo de llevar un contenedor con valor comercial de US\$ 100,000 hacia Pittsburg es 26% más económico si se transporta desde la Ciudad de México que desde París, y menos de la mitad desde Beijing (Jaime, Harald, & Newel, 2012).

La importancia desde el punto de vista macroeconómico de este sector terciario en México, lo deja de manifiesto la cifra del INEGI, ya que representa el 7.0% del Producto Interno Bruto. Así mismo, el automotor de carga y de pasajeros representa en forma conjunta el 76% del Valor Agregado Bruto de la rama Transporte (2011).

Ante esta panorámica, esta rama de servicios amerita concentrar esfuerzos para la administración eficiente de recursos que le permitan fortalecer su estructura económica y operativa, al representar una ventaja competitiva; cabe destacar que se vislumbran cambios importantes en este sector, producto de los últimos acuerdos sobre la cláusula del Tratado de Libre Comercio que sostiene Canadá y Estados Unidos con México en este rubro; se contempla en un mediano plazo que un aumento de las empresas de autotransporte de carga que transitarán por la unión Americana y Canadá.

El 83% y 14.7% de las empresas transportistas en México son Hombre-Camión y pequeñas, respectivamente (INEGI, 2011), de las cuales los empresarios son generalmente operadores que compraron una unidad de autotransporte con medios propios, y se independizaron. Sin lugar a dudas, carecen en su mayoría de herramientas de gestión y optimización de recursos, sus conocimientos son empíricos, dando lugar a decisiones incorrectas, con consecuencias extremas como el cierre de la empresa.

Uno de los insumos más importantes para este negocio, lo constituye el combustible, el cual representa hasta el 32.5% del costo variable operativo por kilómetro de una entidad transportista. (Jaime, Harald, & Newel, 2004)

CAPÍTULO 1

PROPÓSITO Y ORGANIZACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El rendimiento del combustible, es un tema polémico dentro del giro de transporte, ya que existen inconsistencias en cuanto a procedimientos para medir y controlar el mismo, inclusive, para el establecimiento de estándares.

El estándar usualmente considerado por los tomadores de decisiones en las empresas de auto transporte es el que refiere el fabricante del vehículo y se desconoce bajo qué condiciones es determinado, las normas utilizadas en la evaluación experimental son particulares al país de procedencia del vehículo y no se tiene establecida una periodicidad para su actualización (Fuentes J, 2002), así mismo, es casi imposible obtenerlo ya que es totalmente teórico.

Existen varios factores que impactan en el consumo de combustible, sobre los cuales se han hecho investigaciones aisladas y se ha determinado cuánto se puede ahorrar sí se cambian parámetros para cualquiera de estas variables con el objetivo de optimizar:

- Nivel técnico-económico de competencia del operador en la conducción de la unidad. De acuerdo a una investigación realizada empleando diseño de experimentos, se demostró que mejoraba un 22.5% del rendimiento.(Correa, Codollo, & Salazar, 2010)

- Características mecánicas de la unidad. La selección del tren motriz (motor, transmisión, diferencial, llantas, y embrague) en las unidades de autotransporte incide de manera importante en el desempeño de la misma y por ende en la economía del combustible. (Morales, Cervantes, &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, antigüedad de la flota (Rafael, Sánchez, &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 10 °C aumenta el consumo alrededor de 4 %. (IDEA, 2005)

Actualmente se han recomendado varias metodologías o procedimientos para el control del rendimiento de combustible, sugiriendo que mediante el análisis de los históricos de los factores de rendimiento puedan establecerse los valores objetivos de desempeño para todas las unidades que integran la flota (Rafael, 2002). Sin embargo, cada unidad debe tener un estándar de rendimiento específico bajo las distintas condiciones o niveles (factores de incidencia) en los que trabaje.

Se han efectuado investigaciones alrededor del mundo orientadas a construir modelos predictivos para el consumo de combustible, basados en herramientas cuantitativas, a continuación se citan algunas detectadas durante la fase de revisión de la literatura:

- Diseño de modelo matemático para determinar el consumo de combustible basado en el ciclo de movimiento básico modificado (González, 2003). Este modelo parte de la simulación de un viaje real considerando como variables de entrada: frecuencia de rotación mínima en movimiento estable; eficiencia de la transmisión variable con la velocidad, la carga y la marcha conectada; un nuevo criterio de frecuencia de rotación del motor para el cambio de marchas; el frenado con el motor embragado y; nuevas expresiones de cuantificación del consumo de combustible.(Pérez, Fuentes, Codollo, & Toledo, 2010)
- El impacto de la carga y magnitud de la pendiente del camino por donde transitan las unidades destinadas al autotransporte, fueron los principales factores que se consideraron para modelar el consumo de combustible en una investigación realizada en Colombia, en esta investigación se aplicó el diseño de experimentos y el análisis de regresión múltiple.(Posada, 2012)
- El modelo de consumo de combustible incluido en el HDM, ha sido aplicado a nivel internacional.

1.2 Propósito de la organización

El estándar del rendimiento de combustible en las empresas de transporte debe ser diferente al que establece la empresa productora del vehículo ya que éste debe establecerse en función de las condiciones de operación, es decir, tipo de ruta, peso transportado, antigüedad, nivel técnico-económico de conducción del operador y nivel de mantenimiento.

Lo anterior, motiva investigar sobre un modelo estadístico para determinar el estándar de rendimiento de combustible en las empresas transportistas acorde al contexto de operación del sector en México.

1.3 Objetivo General

Diseñar un simulador en Excel basado en un modelo estadístico que contemple los factores que inciden en el rendimiento de combustible de las unidades destinadas al autotransporte de carga en México, así como el impacto de cada uno, para determinar el estándar de rendimiento de combustible, a través de diseño de experimentos y regresión lineal múltiple.

1.4 Objetivos específicos

- Aplicar el diseño de experimentos para determinar el grado de impacto de cada uno de los factores que inciden en el consumo de combustible
- Obtener un modelo estadístico con los factores y niveles que inciden mayormente en el consumo de combustible de las unidades destinadas al autotransporte de carga federal, a través de la herramienta estadística de regresión lineal múltiple.
- Desarrollar un simulador en Excel basado en el modelo estadístico obtenido.

1.5 Preguntas de investigación

Producto de la observación del método efectuado por las empresas de transporte de carga en México, para la administración del combustible, se detecta la ausencia de un procedimiento sistemático y científico respecto a la determinación de estándares de rendimiento y su implementación en el seguimiento del consumo del insumo en las unidades que integran la flota; considerando lo anterior, resulta importante cuestionarse lo siguiente:

1. ¿En qué medida explican los factores de interés (tipo de ruta, peso transportado, antigüedad, nivel técnico-económico de conducción del operador y nivel de mantenimiento) el rendimiento de combustible de las unidades destinadas al autotransporte de carga en México?
2. ¿Cuál es el estándar de rendimiento de combustible que debe generar una unidad destinada al autotransporte de carga en función de sus características mecánicas, operativas y de conducción?
3. ¿Existe un modelo estadístico a través del cual se pueda determinar el consumo de combustible estándar de cada unidad, que contemple los factores de mayor impacto?

1.6 Justificación de la investigación

Después de la revisión de la literatura sobre investigaciones enfocadas a la predicción del consumo de combustible, la cual no es muy basta, se puede observar que los modelos resultantes de dichas investigaciones excluyen variables explicativas importantes como las rutas de viaje con curvas, pendientes, vehículos con remolques (Pérez, Fuentes, Codollo, & Toledo, 2010); técnicas de conducción, curvatura del camino (Posada, 2012); así mismo se han encontrado desviaciones entre las predicciones de algunos de esos modelos (HDM) y los resultados reales (Altamira, 2003). Por otro lado, los modelos de predicción del consumo de

combustible producto de la investigación científica sólo consideran una o máximo tres variables explicativas.

Ante esta panorámica se requiere desarrollar un modelo estadístico integral para determinar el rendimiento de combustible considerando la mayoría de los factores con mayor incidencia en el consumo (las características mecánicas de la unidad, ruta, competencia del operador y carga) basado en técnicas cuantitativas (Diseño de Experimentos y Análisis de Regresión Múltiple) el cual podrá constituir una herramienta de gestión para los directivos de las compañías de este sector, en función de, que les permita una toma de decisiones objetiva.

1.7 Alcances y Limitaciones

Para efectos del presente trabajo, sólo se considerarán unidades dedicadas al transporte de carga federal (no local) con las siguientes configuraciones:

- T3-S2 (Tractor de tres ejes y semirremolque de dos ejes)
- T3-S2-R4 (Tractor de tres ejes, semirremolque dos ejes y remolque de cuatro ejes)

Cabe señalar que la configuración T3 representa un 62% en las unidades motrices que circulan en las carreteras federales, mientras que la configuración S2 Constituye el 76% de las unidades de arrastre, y R4 es la configuración de mayor frecuencia cuando se trata de unidades tipo full (INEGI, 2011)

Cada empresa por limitaciones económicas o bien condiciones particulares de operación tiene equipos con características técnicas específicas, tales como: tipo de motor, diferenciales, tipo y marca de llantas, entre otras; por lo que no será del alcance del presente trabajo determinar los valores óptimos para dichas

especificaciones técnicas, de tal manera que se partirá de las condiciones ya existentes para cada unidad que integrará el estudio.

Otro aspecto determinante para el rendimiento de combustible, es la composición del mismo (diésel), sin embargo resulta complicado controlar ese factor, incluso para las mismas empresas. Por lo anterior esta investigación no contemplará como variable explicativa este factor.

Se sabe que el comportamiento del operador es un factor de alto impacto en el consumo de combustible, sin embargo, sus componentes psicosociales no serán abordados por la presente investigación, sabiendo de antemano que tienen cierto grado de influencia en la variable efecto estudiada.

El modelo estadístico propuesto sobre el rendimiento de combustible fue validado en una empresa transportista mexicana.

1.8 Resultados esperados

- Porcentaje de influencia de cada factor en el consumo de combustible.
- Determinar el grado de impacto en las combinaciones de factores.
- Diseñar un modelo estadístico para determinar el rendimiento de combustible.
- Creación de un simulador que se convertirá en una herramienta de gestión administrativa para los tomadores de decisiones en el ramo del auto-transporte de carga general.

CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO

2.1 Procedimientos para determinar el rendimiento de combustible en el autotransporte 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 compañías 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 “re inicio” de la computadora del motor. Cabe señalar que el re inicio consiste en descargar la información de la computadora del motor con información y métricos generados durante el viaje.

2.2 Efecto de la conducción eficiente en el consumo de combustible

La técnica de la conducción de los vehículos utilizados para el transporte de carga resulta de vital impacto en la economía del combustible, ya que de la misma depende un consumo prudente o excesivo de este insumo.

En este sentido, se ha comprobado de acuerdo a estudios experimentales que conducir eficientemente, puede llegar a representar una mejora en la eficiencia energética hasta del 22.5% (Correa, Codollo, & Salazar, 2010).

La conducción eficiente (técnica-económica) es un procedimiento encauzado a un consumo mínimo de combustible, llantas y repuestos en cualquier tipo de carretera o condiciones de tráfico (Vantelon, 1991). Está basada en procedimientos que especifican la potencia, torque y velocidad para operar el motor en los límites

operacionales óptimos, conocidos como “zona verde” (optimización en el consumo de combustible).

El personal de la empresa transportista puede utilizar diversos sistemas para verificar el consumo de combustible y los parámetros bajo los cuales se manejó el vehículo durante todo el recorrido, de acuerdo a las siguientes denominaciones: **Mínima**: porcentaje de tiempo que permanece encendido el motor con velocidad cero, es decir, sin desplazamiento. **Crucero**: porcentaje de tiempo que opera el motor controlando automáticamente la velocidad del vehículo sin intervención del operador. **Último cambio**: porcentaje de tiempo que opera el vehículo en el último cambio. Con esta información es posible evaluar si se condujo eficientemente. (Correa, Codollo, & Salazar, 2010).

La principal estrategia para impactar de manera positiva el consumo de combustible relacionado con este factor es la capacitación teórica y práctica de los operadores en técnicas de conducción técnica económica y aprovechar las oportunidades de las tecnologías venideras, por ejemplo, sistemas iterativos, CD, videos VHS, etc. (Rafael, Sánchez y Guzmán, 1995).

2.3 Efecto de las características mecánicas de las unidades en el consumo de combustible

Uno de los aspectos que influyen en la economía de combustible y en el desempeño general de las unidades destinadas al transporte de carga es la configuración del tren motriz de la unidad: motor, transmisión, paso diferencial y llantas. (Morales, Cervantes, & Lozano, 2010).

La selección de éste debe ser de acuerdo al tipo de actividad y selección de acuerdo al tipo de recorrido. Lo anterior permite optimizar la utilización de cada componente del tren motriz, permitiendo con esto prolongar la vida útil de cada

uno de ellos, logrando además ahorros considerables de combustible cuando se opera el motor dentro de su régimen de mínimo consumo (Rafael y Zavala, 1999).

Una Investigación realizada por el Instituto Mexicano del Transporte sobre este factor, analizando la operación de flotillas de empresas de transporte de carga en México, se observaron las siguientes diferencias entre las unidades nuevas y antiguas (Rafael y Zavala, 1999):

- El ahorro de energía varía entre el 10 y 15 % de los gastos del consumo anual de combustibles.
- El ahorro de mantenimiento varía entre el 32 y el 40% del costo del mantenimiento anual.

Una buena práctica dentro de la industria es aplicar como política de compra o adquisición de unidades, la especificación del paso diferencial que asegure una operación del tren motriz orientado a la optimización del consumo de combustible (Morales, Cervantes, &Lozano, 2010).

El tipo de transmisión, como elemento del tren motriz, por sí sola, también desempeña un papel importante dentro de la economía de combustible, actualmente algunas productoras han incorporado al mercado transmisiones como la *I-shift*, la cual aseguran es fácil de operar y mantener. La empresa fabricante realizó pruebas en Estados Unidos, obteniéndose ahorros de hasta un 5% de combustible, aunque depende del tipo de conducción, tiene 12 velocidades, cuenta, entre otras características, con sensores de nivel que permiten detectar el peso de la caja que se maneja para definir el esquema de cambios, además de poder realizar saltos entre velocidades para llegar a la de crucero con mayor rapidez, esto cuando la carga y la carretera tienen las condiciones adecuadas.

La transmisión también facilita el proceso de capacitación y formación de los operadores, un periodo que además se acorta gracias a las facilidades que aporta en el manejo y ahorros incluso en el mantenimiento del equipo (Lucena, 2013).

2.4 Efecto de las condiciones de operación en el consumo de combustible

Existen factores ligados a la naturaleza de la operación de una empresa transportista que inciden notablemente en el consumo de energía (combustible), los cuales se expondrán brevemente en los siguientes párrafos:

- Ruta(s) de operación. El impacto de la carga y magnitud de la pendiente del camino por donde transitan las unidades destinadas al autotransporte, fueron los principales factores que se consideraron para modelar el consumo de combustible en una investigación realizada en Colombia, en esta investigación se aplicó el diseño de experimentos y el análisis de regresión múltiple. (Posada, 2012)
- 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:
 - El ahorro de combustible varía entre 8 y 12% del gasto anual de combustibles por vehículo (aprox. 5 000 litros de diésel por año)
 - El ahorro en mantenimiento varía entre el 32 y el 40% del monto anual. Esto representa el mayor beneficio observado
 - 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.

- **Peso transportado.** El peso total de un vehículo incluyendo la carga que transporta, influye directamente en el consumo. Existe un aumento en la potencia requerida por el motor relacionada con el incremento de peso del vehículo por su influencia en la resistencia a la rodadura. El incremento del peso del vehículo (carga transportada) afecta de manera importante el consumo de combustible, especialmente para pendientes altas y muy particularmente por encima del 5%. (Posada, 2012)

La forma de acomodar la carga en el vehículo tiene una influencia importante en cuanto a la eficiencia del combustible. Se debe intentar distribuir la carga de manera que el peso sobre cada eje sea aproximadamente el mismo, y que el contorno exterior del camión sea lo más uniforme posible, de tal forma que se reduzcan al mínimo las pérdidas de potencia debidas a la resistencia aerodinámica.

- **Velocidad promedio.** La máxima velocidad de crucero recomendada para operadores profesionales de tracto camiones es de 90 km/h. Cada 1.6 km/h arriba de 90 km/h cuesta de 2 a 4% más en combustible. Esto significa que si se maneja a una velocidad promedio de 100 km/h, se está gastando de 10 a 20% más combustible. Es importante señalar que también se

incrementa el desgaste de llantas, impactando directamente en los costos de mantenimiento. (CONUEE, 2013)

- Mantenimiento del vehículo. Realizar el mantenimiento preventivo del vehículo permitirá un buen funcionamiento del motor, éste será más eficiente y consumirá menos combustible. Un vehículo en mal estado no sólo consume más combustible, sino también, produce más emisiones nocivas al ambiente. Un vehículo tiene que estar en buenas condiciones para que rinda los kilómetros por litro de combustible que sugiere el fabricante (Rafael y Zavala, 1999).

Dentro del mantenimiento, la presión de los neumáticos, se considera como un aspecto relevante en el consumo y la seguridad, la comprobación de la presión de los neumáticos no constituye normalmente una prioridad en los hábitos del conductor, pero una pérdida de presión en los mismos respecto a la recomendada por el fabricante incide de forma importante en el consumo de combustible. Como dato, una pérdida de presión de 0.3 bares en los neumáticos del vehículo respecto a la recomendada por el fabricante, supone un aumento de consumo de carburante del orden del 3%. Si la presión es muy baja, la resistencia a la rodadura de los neumáticos se incrementa y, por tanto, se incurre en un mayor consumo de combustible. (Treatise, 2005)

- La marcha en ralentí. La marcha en ralentí (el motor trabajando y el vehículo detenido) desperdicia combustible y dinero. Un tracto-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)

2.5 Diseño de experimentos factoriales

Los modelos de diseño de experimentos son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en una variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificar dicha influencia.

Existen varias técnicas de diseño de experimentos, una de ellas, es el diseño factorial. Un diseño factorial es aquél en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo. En este caso se dicen que están cruzados, apareciendo el concepto de interacción.

Los diseños factoriales 2^k son aquellos que estudian k factores con 2 niveles cada uno, y donde se corren los 2^k posibles tratamientos. Son útiles cuando $2 \leq k \leq 5$.

Las etapas o pasos para aplicar esta metodología de acuerdo a Humberto Gutiérrez Pulido y Román de la Vara Salazar (2008) son los siguientes:

1. Planeación y realización
2. Análisis
3. Interpretación
4. Control y conclusiones finales

Una vez que es ejecutado el experimento, los resultados se analizan a través del procedimiento ANOVA, el cual consiste en separar la variación total observada de cada una de las fuentes que contribuyen a la misma.

Los paquetes estadísticos aportan una serie de análisis que permiten determinar los factores con mayor impacto en la variable causa estudiada, y sobre los mismo modelar la respuesta futura. A continuación se describen las principales herramientas:

- Pareto estandarizado. Este gráfico permite visualizar los efectos que tienen un mayor impacto sobre la variable de respuesta, y discriminar aquellos factores con menor impacto.
- Gráficos de Efectos Principales. Muestra el comportamiento de la variable efecto para cada tratamiento de la variable causa.
- Gráfico de interacción. Se presenta gráficamente la interacción entre factores y su efecto en la variable causa.
- Gráfico de Cubo y respuesta predicha. Muestra los valores esperados para la variable efecto para cada nivel de tratamiento de los factores estudiados

Con los datos experimentales resulta provechoso ajustar un modelo de regresión con la finalidad de predecir el valor de Y en diferentes valores de los factores estudiados. En el siguiente subcapítulo se aborda con mayor detalle la técnica estadística de regresión lineal múltiple.

Es importante que una vez obtenido el modelo se verifiquen los supuestos del análisis de varianza: Distribución normal de los residuos, independencia y varianza constante, para determinar la pertinencia estadística de modelo.

2.6 Regresión lineal múltiple

La regresión lineal múltiple estima los coeficientes de la ecuación lineal, con una o más variables independientes, que mejor explique el valor de la variable dependiente.

La forma general de una ecuación de regresión lineal múltiple es:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon$$

Donde los β_j son los parámetros del modelo que se conocen como coeficientes de regresión y ε es el error aleatorio.

El modelo que se obtenga bajo esta técnica deberá ser sometido a pruebas de hipótesis para validar su pertinencia estadística. La hipótesis más importante

consiste en ver si la regresión es significativa. Esto se logra probando la siguiente hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_a: \beta_j \neq 0 \text{ para al menos un } j=1,2,\dots,k$$

Aceptar la H_0 significa que ningún término o variable en el modelo tiene una contribución significativa al explicar la variable respuesta, Y . De lo contrario, implica que por lo menos un término en el modelo contribuye de manera significativa a explicar Y .

El coeficiente de determinación (R^2) es un indicador que mide la calidad de ajuste del modelo, es decir, el porcentaje de variabilidad de los datos que son explicados por el modelo.

En relación a los coeficientes individuales se deberán someter a pruebas de hipótesis individuales, dicha hipótesis se especifica de la siguiente manera:

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_a: \beta_j \neq 0 \quad j=0,1,2,\dots,k$$

Si se acepta la hipótesis nula, el coeficiente que se esté analizando carece de significancia estadística.

Cuando se hace uso de un paquete estadístico para los cálculos matemáticos que dan origen al modelo buscado, generalmente se toma como referencia para evaluar las pruebas de hipótesis el valor P . El valor P es una medida de la significancia general de la ecuación de regresión múltiple, se debe comparar con el nivel de significancia (probabilidad de rechazo de una hipótesis nula verdadera) establecido (alfa), Si este es mayor al valor P se concluye que a falta de evidencia suficiente, no es posible aceptar la hipótesis nula.

Es importante que el modelo que se obtenga sea sometido a las pruebas estadísticas pertinentes para validar los supuestos del modelo:

- Análisis gráficos de residuos. Las gráficas que suelen hacerse para completar el diagnóstico del modelo consisten en: graficar los residuos en papel de probabilidad normal, graficar los residuos contra los predichos, los residuos contra cada variable regresora y contra alguna otra variable importante que no haya sido incluida en el modelo.
- Verificación del supuesto de independencia. Para validar esto, se suele graficar los residuos contra el orden en el que se obtuvieron los datos, la suposición se cumple si los puntos en esta gráfica no siguen ningún patrón bien definido, como alguna tendencia. En ocasiones se opta por realizar la prueba de Durbin-Watson para validar este supuesto, la cual diagnóstica la presencia de correlación entre los residuos consecutivos, que de ser afirmativa, podría estarse omitiendo alguna variable explicativa en el modelo.

CAPÍTULO 3.

MODELO ESTADISTICO QUE PREDICE EL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE EN EMPRESAS DE TRANSPORTE

En este capítulo se presenta el diseño del modelo estadístico para determinar el rendimiento de combustible en las empresas de transporte, a partir de un muestreo piloto de datos históricos de una compañía mexicana.

Este artículo fue presentado en inglés en el Congreso Internacional Global Conference on Business and Finance 2014, Honolulu, Hawái, USA del 6 al 9 de Enero en la Sesión de Administración (Anexo A).

Fué publicado en el Conference on Business and Finance Proceedings, Volumen 10 (1) del 2014, con ISSN 2168-0612 flash drive/ISSN 1941-9589 online, Ebscohost.

STATISTICAL MODEL PREDICTING FREIGHT TRANSPORT FUEL EFFICIENCY

Rosa Amelia Alcántar-Ruiz, UPAEP
Fernando Orue-Carrasco, UPAEP
José Luis Martínez-Flores, UPAEP

ABSTRACT

Fuel spending is a category of greater impact in the carrier companies' costs structure. In Mexico, this represents up to 32.5% of the operating variable cost per kilometer of these companies. Determination of its spending is controversial, given that the method to establish a standard entails inconsistencies; ordinarily that referred by the vehicle manufacturer is considered, which is not helpful under the actual operation conditions, because of its theoretical determination and under ideal conditions. A view of the relevant literature indicates lines of inquiry generating models considering a maximum of three explicative variables, discriminating others relevant such as: soil contour and slopes, types of trailers and driving techniques. This article offers the design of a statistical model based on a multiple regression to predict standard fuel efficiency, considering the most affected factors and actual operating conditions seen in the Mexican transportation sector.

KEY WORDS: Transportation, fuel efficiency, statistical model, multiple regression.

INTRODUCTION

Transport is a key element in the supply chain, in Mexico constitutes a special window of opportunity, given the competitive edge representing its geographical location and the times of trade in regard to its main commercial partner: the United States of America. The economic relevance of this service sector in Mexico is evident, because it represents 7.0% of the Gross Domestic Product. Likewise, the cargo and passengers transportation jointly represent 76% of the gross value added of the transportation activity (INEGI, 2011).

Against this background, the transportation sector must focus its efforts in an effective management of the moneys allowing it to strength its economic and operating structure, by representing a competitive advantage. One of the most important inputs in this area is the fuel, which represents up to 32.5% of the variable operating cost per kilometer of a freight company, (Jaime, Harald, & Newel, 2012).

Efficiency of the fuel is a controversial topic in the field of transportation, due to the inconsistencies found with regard to the fuel control and measurement methods, let alone for establishing standards. Ordinarily, the standard considered by the decision makers of the freight companies is that referred by the vehicle manufacturers but the conditions for its determination is unknown as well, the standards used for experimental evaluation are specific of the country from which the vehicle comes from, and no frequency for updating has been established (Fuentes J, 2002), therefore it is almost impossible to obtain it because of its full theoretical ground and under ideal conditions.

Considering the aforementioned background, this work reflects the progress in the development of a global statistical model to determine the fuel efficiency, taking into account most of the factors affecting consumption (mechanical characteristics of the unit, road, operator's ability and cargo) under quantitative procedures (Design of Experiments and Analysis of Multiple Regression) which may become a management tool for company's officers of the sector, allowing them to make objective decisions.

LITERATURE REVISION

There are multiple factors affecting the fuel consumption which have been separately studied and it has been determined how much fuel is capable to be saved up if parameters of any of these variables are modified to make such expense as effective as possible:

- Technical-economic level of competence of the operator to drive the unit. According to an investigation using experiments design, there was shown an improvement of 22.5% of efficiency. (Correa, Codollo, & Salazar, 2010)
- Unit's mechanical features. Selection of the power mechanism (engine, transmission, differential, tires and clutch) of the carrier's units directly affects the unit's performance and therefore the fuel economy. (Morales, Cervantes, & Lozano, 2010).
- Operation conditions. This category entails, the type of road, size of the freighted cargo, maintenance policies, term of the service cycle, fleet standing. (Rafael, Sánchez, & Guzman, 1995).
- Environmental Conditions. Agents such as weather and the road traffic flow affect the fuel efficiency. By way of example, there has been determined that by travelling upwind the fuel consumption increases due to the aerodynamic effects for up to 8% with 18 km/h

windflaws, and up to 18% with 36 km/h windflaws on a cab deflector vehicle. A drop of atmospheric temperature of 10 °C increases consumption in about 4% (IDEA, 2005).

Literature regarding investigations focused on fuel consumption forecasts, which is scarce, shows that the models resulting from such researches discard major explanatory variables such as winding travelling paths, slopes, trailers (Pérez, Fuentes, Codollo, & Toledo, 2010), as well as driving procedures and soil contour (Posada, 2012); likewise, there have been found a lot of deviations between the estimations of some models (Highway Development and Management) and the actual results (Altamira, 2003). On the other hand, fuel consumption predictive models arisen from the scientific research only consider one or a maximum of three explanatory variables.

PROPOSED CONCEPTUAL MODEL

This work is supported in the use of a powerful statistical method for modeling, and subsequently predict behavior of an interesting effect (fuel efficiency) in terms of several significant factors both quantitative and qualitative (weight, type of way, differential step, unit's seniority, coupling mode, etc.): the multiple linear regression [1] (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (1)$$

A multiple linear regression model is feasible to be obtained by means of arranged experiments, observation of non-controlled phenomena or historical records, being the last the application case addressed in this research.

Products of the multiple linear regression application involving pretended variables (type of coupling, type of road) are the following:

1. Statistical model (regression equation)
2. Variation analysis
3. Correlation coefficient and multiples determination (R and R²)
4. Hypothesis tests in multiple linear regression

METHODOLOGY

This investigation was developed in a Mexican carrier company rated as the largest of this sector, with a fleet comprised by 176 units.

The historical information of a sample of 500 travels was made by such units within the period of June 1st, 2013 and June 31st, 2013, to obtain the multiple linear regression models with pretended variables.

The activities made for such research were the following:

1. Design and implementation of an instrument to obtain the company's energy performance.
2. Selection of explanatory variables to build the statistical model.
3. Obtaining of historical information of the journeys' sampling, and its validation by means of the company's records consultation such as driving test reports, unit's technical specifications, travels history, maintenance logs, personnel files and engine computer reset sheets, among others.
4. Obtaining of preliminary model.

RESULTS

There were selected as pretended variables of the fuel efficiency: freighted weight, differential step (power train configuration), coupling mode, type of road, standing and engine brand. Table 1 outlines level or treatment where factors may appear.

Table 1. Detail of explicatory variables used in the linear regression model

Variable	Type	Level 0	Level 1
Net weight freighted (tons)	Quantitative	NA	NA
Coupling mode	Qualitative	Single truck	Double decker truck
Differential step	Quantitative	NA	NA
Type of engine	Qualitative	Caterpillar C-15	Cummins ISX

Type of road	Qualitative	Greater distance mileage with no slope	Greater distance mileage with slope
Standing (years)	Quantitative	NA	NA

This table describes the variables used in the regression models. Source: Research.

After historical information of the 500 journeys sample was processed by Minitab, the following multiple linear regression model was obtained:

$$\text{Efficiency (Y)} = 2.63 + 0.0487 \text{ road} - 0.0213 \text{ weight} - 0.023 \text{ differential step} + 0.0344 \text{ type of engine} - 0.0184 \text{ standing.}$$

The statistics of the multiple linear regression model, the variance analysis and the hypothesis tests are shown in Tables 2, 3 and 4, respectively.

Table 2. Multiple Linear Regression Statistics

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple correlation coefficient	0.69113735
R ² determination coefficient	0.477670837
Adjusted R ²	0.403052385
Typical error	0.09654036
Remarks	500

This table shows the regression model statistics of the fuel efficiency variable. Source: Research.

Table 3. Analysis of Model Variance

	<i>Degree of Freedom</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Average of Squares</i>	<i>F</i>	<i>F Critical Value</i>
Regression	5	0.298311727	0.05966235	6.40151096	0.000254886
Residual	35	0.32620144	0.00932004		
Total	40	0.624513167			

This Table shows significance of the fuel efficiency variable regression model. Source: Research.

Table 4. Hypothesis Tests for Predictive Variables

	<i>Coefficients</i>	<i>Typical error</i>	<i>Statistics t</i>	<i>Probability</i>
Intersection	2.517154825	0.570962436	4.40861722	9.43E-05
Road	0.142055451	0.071065507	1.99893671	0.05342787
Weight	-0.020505304	0.004250382	-4.82434424	2.7242E-05
Differential step	-0.026103204	0.117537134	-0.22208474	0.82553874
Engine	0.029044123	0.04186522	0.69375301	0.4924161
Standing	-0.019153064	0.010807478	-1.77220478	0.08506621

This Table shows comparable parameters of the hypothesis tests applicable to the model. Source: Research.

FINDINGS

Taken together, variables only explain 40.30% (R^2 adjusted) of the fuel efficiency and keep a mutual interrelation of 69%.

Notwithstanding that variables were taken to select the sample, for vehicles with a maintenance level completed according to the company's policies and manufacturer's advice, and which were driven by qualified and competent operators of the company, model fails to estimate at least 90% of the fuel efficiency behavior.

It is important to highlight that the model has a statistical significance because the calculated F value is capable to be obtained and compared with the critical F (the latter is less than the calculated).

In relation to the hypothesis test results it can be deduced that the exchange to differential and the type of engine with a confidence level of 90% are not significant variables for this model. This is because the company assumed as strategy to make the efficiency as effective as possible to request the heavy vehicles provider a vehicles' configuration appropriate to the road and the speed the operational unit will be required to go through; also, path changes between the units were not agreed, keeping running the most of the vehicles in only one type of road. It is important to mention that, the failure in the implementation of such strategies or policies, would be likely very significant for a fuel efficiency estimation.

As next step in this research, experiments design based on such variables will be applied and any others such as operator's competence and maintenance conformance, under controlled conditions allowing that impact affecting any of such variables is determined and distinguish non-representative variables to build a fuel efficiency model entailing a greater explicative and predictive ability.

REFERENCES

Altamira, A (2003). *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. 216 p.

Correa A., Cogollo J. y 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), p. 96-112.

Fuentes J. (2002) *Selección, Evaluación y Renovación del Parque Vehicular*, UCF, p. 190.

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

IDEA, (2005), *Manual de conducción eficiente para conductores de vehículos industriales*. Recuperado el 10 de julio de 2011.

http://www.uned.es/experto-profesional-conduccion-racional/manual_conduccion_industriales.pdf

INEGI, (2011), *Estadística Básica del Autotransporte Federal*.

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

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

Rafael, M., Cervantes J. y Lozano A., (2010), *Eficiencia Energética del tren motriz de vehículos pesados con reducción de CO²*. Memorias del XVI Congreso Internacional Anual SOMIN.

CAPITULO 4.

MODELO ESTADÍSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE EN EMPRESAS TRANSPORTISTAS

En el capítulo 4, se realizó un diseño de experimentos para evaluar el impacto de las variables estudiadas, esto bajo un ambiente controlado. El resultado de esta etapa fue documentada a través del presente artículo, el cual será sometido a publicación en una revista científica.

MODELO ESTADÍSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE EN EMPRESAS TRANSPORTISTAS

Rosa Amelia Alcántar Ruiz, Francisco Edmundo Treviño Treviño y José Luis Martínez Flores

RESUMEN

El gasto de combustible para cualquier empresa de transporte tiene un impacto importante en la estructura de costos, la determinación del estándar de rendimiento de combustible es una tarea complicada para los tomadores de decisiones en las empresas de transporte, ya que existen inconsistencias en cuanto a procedimientos para medirlo y controlarlo; comúnmente se considera el que refiere el fabricante del vehículo, sin embargo no es posible obtenerlo, ya que es totalmente teórico y se desconoce bajo qué condiciones es determinado.

A través del presente trabajo fue posible cuantificar el impacto en el rendimiento de combustible de los siguientes factores: Características mecánicas de las unidades, competencia técnico-económica del operador, tipo de ruta, modalidad de acople, estado del mantenimiento y antigüedad del equipo de autotransporte, así como un modelo estadístico preliminar sobre el rendimiento de combustible mediante el uso de diseño de

experimentos y regresión lineal múltiple, con aplicación a las empresas de transporte de carga en México.

Este modelo resultó con significancia estadística considerando un nivel de confianza del 95% y explica un 50% del comportamiento de la variable estudiada (rendimiento de combustible).

Cabe señalar que este documento es un avance de una investigación, cuyo objetivo final es la obtención de un modelo estadístico robusto que constituya una nueva herramienta de gestión de este insumo (combustible) dentro de la industria del transporte bajo condiciones reales de operación, y no experimentales (empleadas por el fabricante).

PALABRAS CLAVE

Rendimiento de combustible, diseño de experimentos, regresión lineal múltiple y transporte de carga

STATISTICAL MODEL FOR DETERMINING THE PERFORMANCE FUEL TRANSPORT COMPANIES

ABSTRACT

Fuel consumption for any transportation company has a significant impact on the cost structure, determining the fuel efficiency standard is a difficult task for decision makers in transport companies, because there are inconsistencies in procedures to measure and control it; commonly considered which relates the vehicle manufacturer, however it is not

possible to obtain, as it is completely theoretical and unknown under what conditions is determined.

Through this paper was possible to quantify the impact on fuel efficiency of the following factors: Mechanical characteristics of the units, technical and economic competence of the operator, route type, mode coupling, maintenance status and age of the equipment of motor transport and a preliminary statistical model on fuel efficiency by using design of experiments and multiple linear regression with application to freight companies in Mexico. a confidence level of 95% and 50% explains the behavior of the variation (fuel efficiency).

Note that this document is a preview of an investigation, whose ultimate goal is to obtain a robust statistical model that constitutes a new tool for managing this input (fuel) within the transport industry under actual operating conditions, and not experimental (employed by the manufacturer).

KEYWORDS

Fuel efficiency, design of experiments, multiple linear regression and freight

JEL: C01, C03, C09

1. INTRODUCCIÓN

La industria del transporte en México representa una gran importancia en la economía, ya que estadísticas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía ponen de manifiesto que un 7.0% del Producto Interno Bruto Nacional está conformado por esta actividad económica (INEGI, 2011).

Dentro de la estructura de costos operativos por kilómetro variables para las compañías que integran este sector, el gasto de combustible impacta hasta en un 32.5% (Jaime, Klein y Newel, 2012). Teniendo el antecedente anterior, los tomadores de decisiones de las empresas transportista en México se enfocan en administrar con eficiencia dicho insumo.

Una de las arduas tareas en la administración del combustible, lo constituye el establecer estándares de rendimiento, ya que prácticamente se toma en cuenta el que refiere el fabricante (Fuentes, 2002); esto impide que se logre replicar en los viajes ejecutados por las empresas de transporte en México debido a la diferente naturaleza del entorno operativo: tipo de carga, tipo de ruta, nivel de competencia de manejo técnico económico por parte del operador, entre otras.

Considerando los antecedentes mencionados, el presente trabajo muestra el desarrollo de un modelo estadístico para determinar el rendimiento de combustible tomando en cuenta los factores que inciden en el consumo (las características mecánicas del vehículo, ruta, competencia del operador y carga) basado en Diseño de Experimentos y Análisis de Regresión Múltiple. Este modelo se espera que constituya una herramienta de gestión para los directivos de las compañías de este sector, que les permita una toma de decisiones objetiva.

2. 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 extensa, además se puede observar que los modelos resultantes de dichas investigaciones excluyen variables explicativas importantes como son las rutas de viaje con curvas, pendientes, vehículos con remolque (Pérez et al., 2010), así como técnicas de conducción y curvatura del camino (Posada, 2012). Asimismo, 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 otro lado, los modelos de predicción del consumo de combustible sólo consideran una o máximo tres variables explicativas.

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. (Correa, Cogollo y Salazar, 2010)
- Características mecánicas de la unidad. La selección del tren motriz (motor, transmisión, 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 10° C aumenta el consumo alrededor de 4 %.(IDEA, 2005).

El presente trabajo se sustenta en la aplicación de regresión lineal múltiple (Gutiérrez y De la Vara, 2008) 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, tales como, peso, tipo de ruta, pasó al diferencial, antigüedad de la unidad, modalidad de acople, etc

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

3.1 Diseño del experimento.

A continuación se presenta la metodología propuesta para el diseño y ejecución del experimento a partir del cual será posible determinar un modelo estadístico sobre el rendimiento de combustible en una empresa transportista.

3.2 Objetivo

Este modelo tiene como objetivo determinar el grado de impacto de cada uno de los factores que intervienen en el rendimiento de combustible de las unidades destinadas al transporte de carga, a fin de establecer un modelo estadístico basado en diseño de experimentos y regresión lineal múltiple que permita determinar el consumo del mismo.

3.3 Variable respuesta

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.

3.4 Factores y niveles

A continuación se describen las variables explicativas para el efecto de interés y los niveles de tratamiento para cada una:

- a) Factor 1: Características mecánicas.
 - i) Nivel 1: Modelo KW-T800
 - ii) Nivel 0: Otro Modelo
- b) Factor 2: Competencia técnica-económica del operador.
 - i) Nivel 1. Competente: En este nivel se encuentran los operadores que han acreditado exámenes teórico / prácticos de manejo técnico-económico.
 - ii) Nivel 0: No competente: En esta clasificación se incluyen los operadores que no han sido acreditados en técnicas económicas de conducción.
- c) Factor 3: Ruta.
 - i) Nivel 0. Camino llano: Mayor kilometraje entre el origen y destino del viaje sin pendientes y/o curvas.
 - ii) Nivel 1. Camino lomerío y montañoso: Mayor kilometraje entre el origen y destino del viaje con pendientes y/o curvas
- d) Factor 4: Modalidad de acople unidad motriz (tractor) y remolque.

- i) Nivel 0: Unidad articulada. Se refiere al arrastre de un solo remolque por la unidad motriz (tractor).
 - ii) Nivel 1: Unidad doblemente articulada. Unidad motriz arrastrando dos remolques.
- e) Factor 5: Estado de mantenimiento.
- i) Nivel 1: Conforme. Se considera mantenimiento conforme cuando la unidad motriz y su(s) remolque(s) han recibido el mantenimiento preventivo de acuerdo al programa recomendado por el fabricante, así como que no presente ninguna falla en ambos componentes que amerite un mantenimiento correctivo antes de ejecutar el viaje.
 - ii) Nivel 0: No conforme. No cumplimiento del programa de mantenimiento preventivo recomendado por el fabricante para el tractor y remolque(s) o bien presenta falla mecánica.
- f) Factor 5: Antigüedad.
- i) Nivel 0. Antigüedad mayor a 5 años.
 - ii) Nivel 1. Antigüedad igual o menor a 5 años.

4. OBTENCIÓN DEL MODELO A PARTIR DE LOS DATOS DE UNA EMPRESA TRANSPORTISTA EN MÉXICO

4.1 Diseño Experimental

La aplicación de la metodología propuesta para la determinación de un modelo estadístico de rendimiento de combustible fue desarrollada en una empresa transportista mexicana clasificada como grande dentro del sector, con una flotilla integrada por 176 unidades.

Se ejecutaron una serie de experimentos durante el periodo comprendido de los meses de Septiembre a Diciembre del 2013. Dichos experimentos consistieron en medir el rendimiento de combustible bajo distintos tratamientos para los factores que hipotéticamente se consideran como influyentes: conducción técnico-económica, características mecánicas de las unidades, tipo de ruta, etc.

Se consideró la metodología propuesta por Gutiérrez y De la Vara (2008).

a) Características mecánicas. Los niveles fueron seleccionados de acuerdo al parque vehicular de la empresa donde se ejecutaron los experimentos, para mayor detalle consultar la Tabla 1.

i) KW-Modelo T800

ii) International PROSTAR

Modelo	Cantidad	Paso diferencial	Motor
KW-Modelo T800	51	4.30	Caterpillar C-15
International PROSTAR	106	4.56	Cummins ISX

Tabla 1- Distribución y características mecánicas de la flota sujeta al DOE.

Fuente: Elaboración propia (2013)

De acuerdo al objetivo del experimento, se requiere investigar el efecto de un conjunto de varios factores sobre una variable respuesta, por lo que se selecciona un diseño que considere todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores y, así mismo, estudie tanto efectos principales como efectos de interacción, minimizando el costo de la experimentación. Estos requerimientos son satisfechos utilizando un diseño factorial 2^k

con k=6 factores, se eligió un diseño factorial 2^6 con una réplica para un total de 64 corridas experimentales. En la Tabla 2 se describe de manera parcial (solamente las primeras 18 corridas) el diseño factorial para esta aplicación.

UNIDAD	ANTIGÜEDAD	RUTA	ACOPLE	MANTENIMIENTO	CONDUCCIÓN
Kwt800	Mayor a 5 años	Lomerío	Full	No conforme	No conforme
Kwt800	Mayor a 5 años	Lomerío	Sencillo	Conforme	Conforme
Kwt800	Menor e igual 5	Lomerío	Sencillo	No conforme	Conforme
Inter PROSTAR	Mayor a 5 años	Lomerío	Full	No conforme	Conforme
Kwt800	Mayor a 5 años	Llana	Sencillo	Conforme	Conforme
Inter PROSTAR	Menor e igual 5	Llana	Sencillo	No conforme	Conforme
Kwt800	Menor e igual 5	Lomerío	Full	No conforme	Conforme
Inter PROSTAR	Menor e igual 5	Lomerío	Full	Conforme	No conforme
Inter PROSTAR	Menor e igual 5	Lomerío	Sencillo	No conforme	No conforme
Kwt800	Mayor a 5 años	Lomerío	Full	No conforme	Conforme
Kwt800	Menor e igual 5	Lomerío	Full	Conforme	No conforme
Inter PROSTAR	Menor e igual 5	Llana	Full	Conforme	No conforme
Inter PROSTAR	Menor e igual 5	Lomerío	Full	Conforme	Conforme
Inter PROSTAR	Menor e igual 5	Lomerío	Full	No conforme	Conforme
Kwt800	Menor e igual 5	Llana	Full	No conforme	Conforme
Kwt800	Menor e igual 5	Llana	Sencillo	Conforme	Conforme
Inter PROSTAR	Mayor a 5 años	Llana	Sencillo	Conforme	No conforme

Inter PROSTAR	Menor e igual 5	Llana	Full	Conforme	Conforme
------------------	-----------------	-------	------	----------	----------

Tabla 2- Diseño factorial para el rendimiento de combustible.

Fuente: Elaboración propia (2013)

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando el *software* estadístico MINITAB ®. El análisis de varianza, los gráficos de efectos e interacciones, los coeficientes de determinación (R^2) y el gráfico de superficie de respuesta serán generados con el mismo *software*.

4.2 Ejecución del experimento

Cada uno de los tratamientos involucrados en el diseño de este experimento fueron ejecutados en las instalaciones y con el equipo de la empresa transportista donde se desarrolló esta investigación.

A continuación se describen las actividades realizadas durante el experimento:

- Diseño de un formato donde se registraron los pormenores de los “viaje prueba”, tales como el número económico de la unidad, peso transportado, ruta, antigüedad, modalidad de acople y mantenimiento. Esto con el objetivo de tener una bitácora que permitiera darle trazabilidad al experimento.
- Análisis de la ruta que recorrerá la unidad, antes de salir de viaje para clasificarla como llano o lomerío.
- Revisión de la bitácora de mantenimiento de la unidad, con el objetivo de validar el nivel correspondiente para ese factor (mantenimiento).

- Validación del nivel de competencia técnico-económica del operador a través de los documentos que la acrediten.
- Solicitud al operador o personal de mantenimiento de la empresa para verificar el funcionamiento correcto de los indicadores del tablero, específicamente el odómetro.
- Validación de que la unidad de transporte se abastezca de diesel a tanque lleno antes de salir a ruta. Asimismo se registraron los litros cargados en la bitácora de viaje.
- Revisión de la información de la computadora del motor, una vez finalizado el recorrido para obtener datos como el rendimiento teórico de combustible; así como sumar los litros de combustible que hayan sido cargados durante el viaje.
- Obtención de los kilómetros recorridos directamente del odómetro para determinar el efecto del experimento: rendimiento de combustible.

4.3 Análisis de los resultados del experimento

Con la información de la bitácora de viaje, el reporte de la computadora del motor y la revisión de algunos reportes de la compañía transportista, se procedió a analizar el efecto del rendimiento de combustible de acuerdo al diseño de experimento ejecutado, esto a través del *software* estadístico.

Fueron seleccionadas las siguientes variables explicativas para estudiar el comportamiento en el rendimiento de combustible bajo condiciones experimentales, las cuales fueron explicadas en la sección anterior: antigüedad, características mecánicas de las unidades, modalidad de acople, tipo de ruta, competencia en la conducción y estado

del mantenimiento. En la Tabla 3 se detallan los niveles o tratamientos en los que podían presentarse los factores.

Variable (factor)	Nivel 1	Nivel 0
Características Mecánicas de la unidad	KW-T800	Otra marca y/o modelo
Modalidad de acople	Doble remolque	Un remolque
Competencia en la conducción	Conforme	No Conforme
Tipo de ruta	Mayor kilometraje de recorrido con pendiente y/o curva	Mayor kilometraje de recorrido sin pendiente y/o curva
Antigüedad (años)	Mayor a 5 años	Menor e igual a 5 años
Mantenimiento	Conforme	No Conforme

Tabla 3- Detalle de las variables explicativas utilizadas en el modelo de regresión lineal.

Fuente: Elaboración propia (2013)

Procesando la información en el software estadístico, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4, considerando los efectos de los tratamientos principales y las iteraciones dobles, ya que las triples y cuádruples por la naturaleza del experimento no son relevantes

FACTOR	EFECTO	COEFICIENTE	COEF. SE	T	P
CONSTANTE		1.9009	0.04341	43.79	0
UNIDAD/CARACTERISTICAS MECANICAS	0.0238	0.0119	0.04341	0.27	0.786
ANTIGUED	0.0756	0.0378	0.04341	0.87	0.389
RUTA	-0.4025	-0.2013	0.04341	-4.64	0
ACOPLE	0.1894	0.0947	0.04341	2.18	0.035
MANTENIMIENTO	0.0088	0.0044	0.04341	0.1	0.92
CONDUCCIÓN	0.3794	0.1897	0.04341	4.37	0
UNIDAD*ANTIGUED	-0.0437	-0.0219	0.04341	-0.5	0.617
UNIDAD*RUTA	-0.1681	-0.0841	0.04341	-1.94	0.06
UNIDAD*ACOPLE	-0.0575	-0.0287	0.04341	-0.66	0.511
UNIDAD*MANTENIMIENTO	0.1356	0.0678	0.04341	1.56	0.126
UNIDAD*CONDUCCIÓN	0.0313	0.0156	0.04341	0.36	0.721
ANTIGUED*RUTA	-0.0775	-0.0388	0.04341	-0.89	0.377
ANTIGUED*ACOPLE	0.0381	0.0191	0.04341	0.44	0.663
ANTIGUED*MANTENIMIENTO	0.1637	0.0819	0.04341	1.89	0.066
ANTIGUED*CONDUCCIÓN	-0.0669	-0.0334	0.04341	-0.77	0.445
RUTA*ACOPLE	0.0675	0.0338	0.04341	0.78	0.441
RUTA*MANTENIMIENTO	0.0056	0.0028	0.04341	0.06	0.949
RUTA*CONDUCCIÓN	-0.2013	-0.1006	0.04341	-2.32	0.025
ACOPLE*MANTENIMIENTO	0.0813	0.0406	0.04341	0.94	0.355
ACOPLE*CONDUCCIÓN	0.0181	0.0091	0.04341	0.21	0.836
LLANTAS*CONDUCCIÓN	-0.0787	-0.0394	0.04341	-0.91	0.37

Tabla 4- Resultados obtenidos de MINITAB para las variables explicativas seleccionadas.

Fuente: Elaboración propia (2013)

De acuerdo a los datos mostrados en la Tabla 4, donde se resaltan los factores con mayor relevancia estadística en negrita (valor P menor al 5%) y el diagrama de Pareto (Figura 1), se opta por analizar de nuevo el experimento considerando los factores y las iteraciones de mayor impacto: ruta, acople, conducción y la iteración entre ruta y conducción.

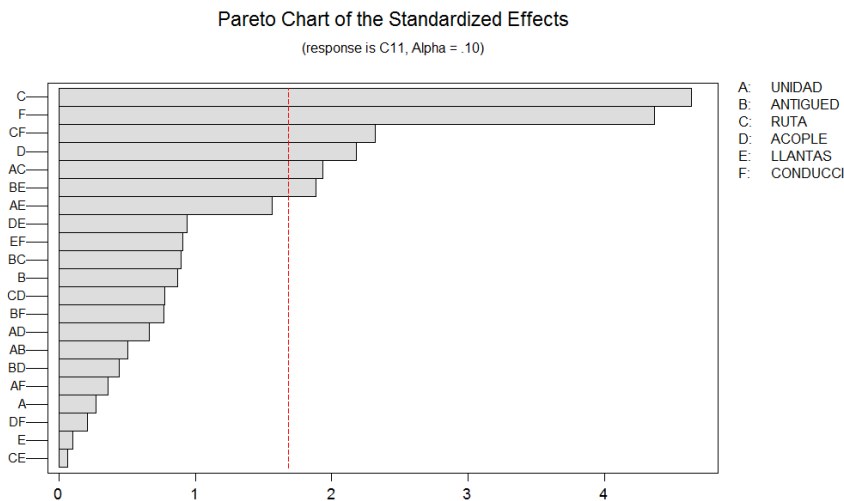


Figura 1- Diagrama de Pareto para los efectos: unidad, antigüedad, ruta, acople, llantas y conducción.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 5 y las Figuras 2, 3 y 4 se presentan los resultados generados por el software MINITAB considerando los factores con mayor importancia estadística: ruta, acople, conducción e interacción entre ruta y conducción:

Factor	Effect	Coef SE	Coef T	P	
Constante	1.9009	0.04279	44.42	0.000	
RUTA	-0.4025	-0.2013	0.04279	-4.70	0.000
ACOPLE	0.1894	0.0947	0.04279	2.21	0.031
CONDUCCIÓN	0.3794	0.1897	0.04279	4.43	0.000
RUTA*CONDUCCIÓN	-0.2012	-0.1006	0.04279	-2.35	0.022

Análisis de Varianza

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	5.4687	5.46871	1.82290	15.55	0.000
2-Way Interactions	1	0.6480	0.64802	0.64802	5.53	0.022
Residual Error	59	6.9152	6.91521	0.11721		
Lack of Fit	3	0.0818	0.08176	0.02725	0.22	0.880
Pure Error	56	6.8335	6.83345	0.12203		
Total	63	13.0319				

Estimación de los coeficientes

Term Coef

Constant	1.90094
RUTA	-0.201250
ACOPLE	0.0946875
CONDUCCIÓN	0.189687
RUTA*CONDUCCIÓN	-0.100625

$$R^2=57.25$$

$$R^2_{adj}=50.43$$

$$R=76\%$$

Tabla 5- ANOVA mejorado con los factores de mayor impacto.

Fuente: Elaboración propia (2013)

En el Diagrama de cubo (Figura 2) se aprecia la respuesta predicha en cada punto del diseño. Por ejemplo para una combinación donde se tenga una modalidad de acople sencillo, nivel de conducción no conforme y un camino llano, se tendrá un rendimiento de combustible 1.7575 (kilómetros por litro).

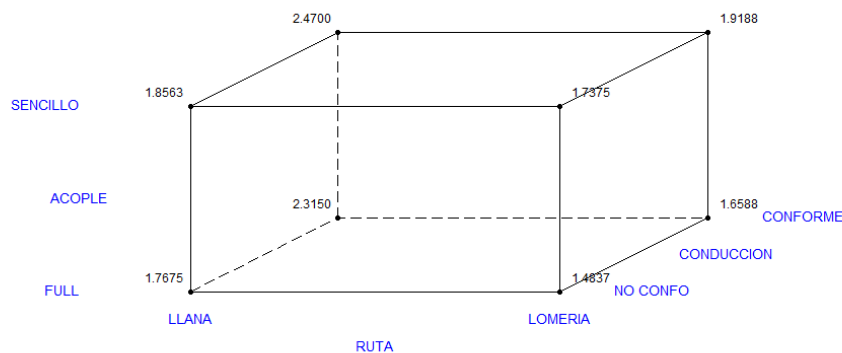


Figura2- Diagrama de cubo.

Fuente: elaboración propia (2013)

La interacción entre la ruta y la conducción queda de manifiesto en la Figura 3, así mismo a través de los resultados de la Gráfica de efectos principales (Figura 4), puede comprobarse que los niveles que optimizan el rendimiento de combustible son: ruta llana, conducción conforme y la modalidad sencilla de acople.

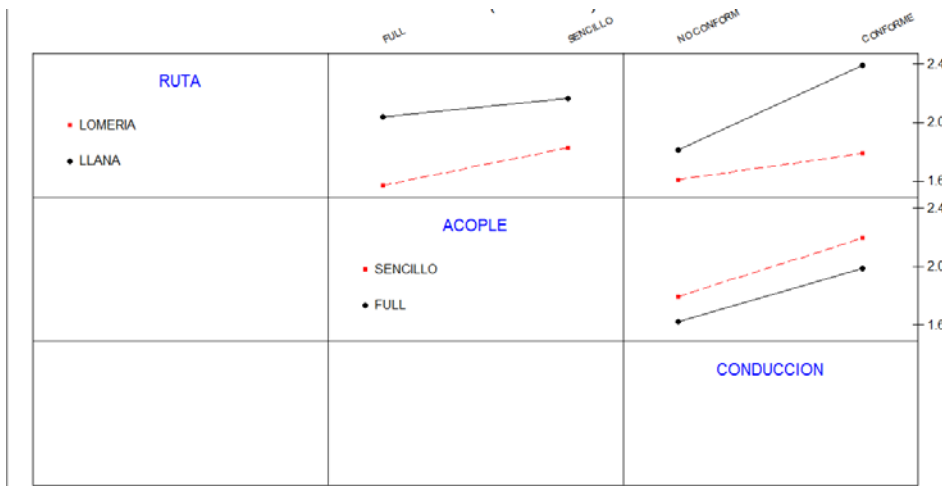


Figura 3- Diagrama de interacción.

Fuente: Elaboración propia (2013)

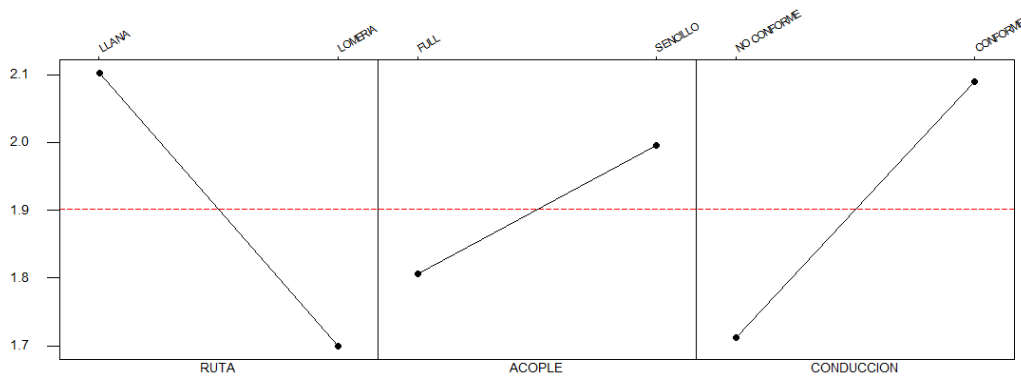


Figura 4- Gráfico de efectos principales.

Fuente: Elaboración propia (2013)

El mejor análisis ANOVA (Tabla 5) permite asegurar que el modelo tiene relevancia estadística, ya que el valor p (probabilidad) es menor al 5%. Los factores considerados en el mejor análisis (ruta, conducción, acople y la interacción de ruta y conducción)

explican en conjunto el 50% (R^2 adj) del comportamiento de la variable respuesta, así mismo el coeficiente de correlación denota que están relacionadas en un 76%.

Por último se presenta la estimación de los coeficientes para construir el modelo estadístico de predicción:

$$(1) \text{ Rendimiento} = 1.90 - 0.2012 \text{ Ruta} + 0.946 \text{ Acople} + 0.1896 \text{ Conducción} - 0.1006 \text{ Conducción} * \text{Ruta}$$

A partir de este modelo simulando un viaje con las siguientes condiciones operativas:

Ruta: Monterrey-México (considerada con mayor kilometraje con pendiente y/o curvas)

Acople: Sencillo

Conducción: Conforme

El rendimiento de combustible esperado es de 1.79 Kilometro por Litro

Este modelo estadístico es factible de ser simulado en Excel para que la empresa transportista pueda generar el estándar de rendimiento de combustible de sus unidades, sin embargo este simulador se consolidará en la segunda etapa de la investigación, dicho simulador se convertirá en una herramienta de gestión para pronóstico y evaluación del desempeño (energético) de los vehículos que integran la flota de la empresa en cuestión.

CONCLUSIONES

De las variables que se consideraron para el experimento, resultaron tener mayor relevancia para ser predictoras solamente la ruta, la modalidad de acople, la técnica de conducción y la interacción entre la ruta y la conducción, explicando en conjunto un 50% de la variabilidad en el rendimiento del combustible.

En contraste, las características mecánicas de la unidad, la antigüedad y el mantenimiento fueron variables con menor impacto, y con carencia de relevancia estadística para obtener el modelo predictor del rendimiento de combustible en esta empresa de transporte, esto con un nivel de confianza del 95%.

Los resultados en relación a las características mecánicas de la unidad se deben a que la empresa adoptó como estrategia para optimizar el rendimiento solicitar al proveedor de los tracto-camiones la configuración de los mismos de acuerdo a la ruta y la velocidad que se requerirá que cubra el vehículo en operación; así mismo se implementó no hacer cambios de rutas entre las unidades, manteniendo la mayoría de los vehículos operando en un sólo tipo de ruta. Es importante destacar, que sin la implementación de estas estrategias o políticas este factor probablemente resultaría con un alto nivel de significancia dentro del modelo de predicción de rendimiento de combustible.

Las condiciones de operación que optimizan el gasto de combustible para esta empresa de transporte son la ruta llana, técnica de conducción económica conforme y la modalidad de acople sencillo.

En la segunda fase de la investigación se analizará una muestra de viajes históricos recientes estudiando el impacto de la presencia de las variables: peso, antigüedad, tipo de ruta y la cantidad de diésel consumida en baja (unidad en reposo, con el motor prendido) aplicando regresión lineal múltiple, con el objetivo de tener un modelo estadístico para la toma de decisiones para la empresa en cuestión con un mayor volumen de datos y considerando las variables significativas proyectadas por el Diseño de experimentos aplicado.

REFERENCIAS

ALTAMIRA, A. (2003). *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. 216 p.

CORREA A., COGOLLO J. y 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), p. 96-112.

FUENTES J. (2002) *Selección, Evaluación y Renovación del Parque Vehicular*, UCF, p. 190.

GUTIÉRREZ, H y DE LA VARA R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. (2da. Edición). México: McGraw-Hill.

IDEA, (2005), *Manual de conducción eficiente para conductores de vehículos industriales*. Recuperado el 10 de julio de 2011.

http://www.uned.es/experto-profesional-conduccion_racional/manual_conduccion_industriales.pdf

INEGI, (2011), *Estadística Básica del Autotransporte Federal*.

JAIME, E., KLEIN, H. y NEWEL, R. (2012). *Los retos de la competitividad en México. Una agenda de reformas inmediatas*. Recuperado el 02 de agosto de 2012, http://www.la.fnstfreiheit.org/uploads/1198/NaumanCompetitividad_final.pdf

MONTGOMERY, D. (2005). *Design and analysis of experiments*. (5ed). New York: John Wiley & Sons,

PÉREZ R., FUENTES J., COGOLLO J. y 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, SANCHEZ N. M., GUZMÁN R. C. (1995), *Manual de Conducción Técnica de Vehículos Automotores Diesel*, Publicación Técnica No. 70 Instituto Mexicano del Transporte.

RAFAEL, M., CERVANTES J. y LOZANO A., (2010), *Eficiencia Energética del tren motriz de vehículos pesados con reducción de CO²*. Memorias del XVI Congreso Internacional Anual SOMIN.

CAPITULO 5.
MODELO ESTADÍSTICO QUE PERMITE OBSERVAR EL IMPACTO DE LOS FACTORES QUE INCIDEN EN EL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE

En el capítulo 5 se muestra el artículo aceptado el 19 de Marzo del 2015 en la revista Nova Scientia, ISSN 2007 - 0705 (Anexo B)

MODELO ESTADÍSTICO QUE PERMITE OBSERVAR EL IMPACTO DE LOS FACTORES QUE INCIDEN EN EL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE
Rosa Amelia Alcántar Ruiz, Francisco Edmundo Treviño Treviño y José Luis Martínez Flores

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*

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, transmisión, 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 10° 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 compañías 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 tracto 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).

$$(1)Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \varepsilon$$

X₁=Tipo de ruta de operación

X₂=Antigüedad de la Unidad

X₃=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-Salttillo, 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.

Variabes 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 5

ANOVA y Resultados de pruebas de hipótesis del modelo de regresión

<i>Variable</i>	<i>Coef</i>	<i>SE Coef</i>	<i>T</i>	<i>P</i>	<i>VIF</i>
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

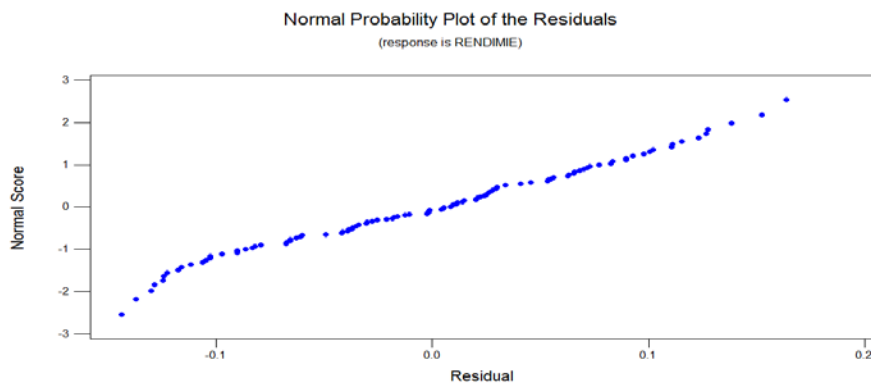
<i>Fuente</i>	<i>DF</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Regresión	3	9.1238	3.0413	537.85	0.000
Error Residual	106	0.5994	0.0057		
Total	109	9.7232			

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

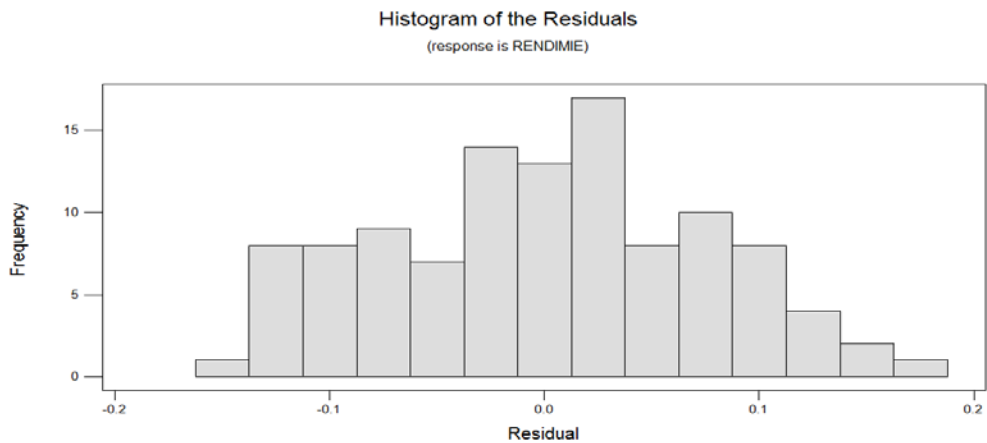
Gráfica de Probabilidad Normal para los residuos



Fuente: Elaboración propia con minitab ® (2013)

Gráfico 2

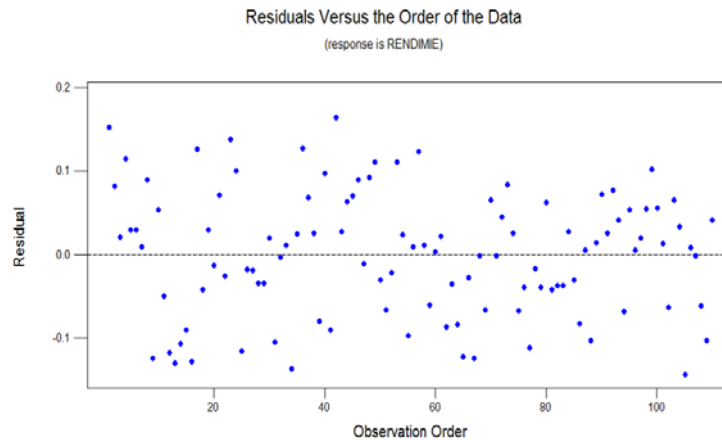
Histograma de los residuales



Fuente: Elaboración propia con minitab ® (2013)

Gráfico 3

Residuos Vs Orden de datos



Fuente: Elaboración propia con minitab ® (2013)

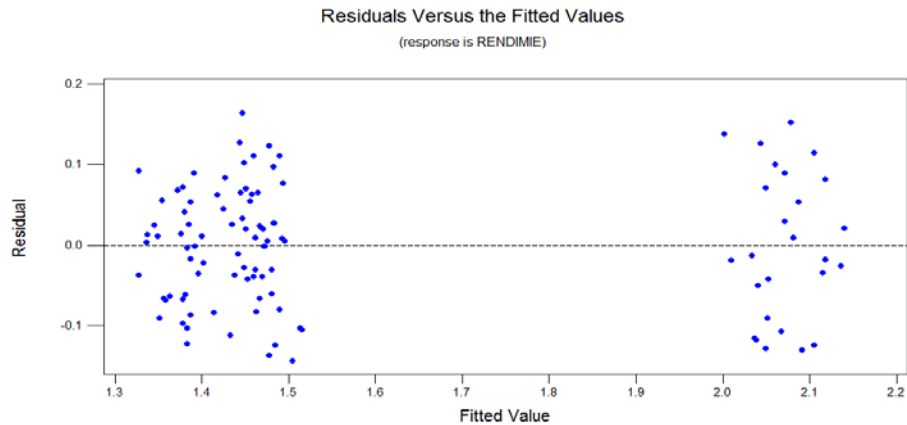
El supuesto de normalidad se comprueba con la gráfica de probabilidad normal de los residuos (Gráfico 1) y el histograma de residuos (Gráfico. 2). En la gráfica de residuos contra pronóstico (Gráfico 4), se nota que tienen una varianza aproximadamente constante.

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 multicolinealidad 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, de 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 co^2* , 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

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

En esta investigación se propone un modelo teórico estadístico sobre el rendimiento de combustible para la toma de decisiones, el cual fue validado en una empresa de transporte mexicana obteniéndose dos modelos preliminares antes del modelo definitivo producto del presente trabajo:

El primer modelo obtenido (artículo del capítulo 3) fue con una muestra de 500 datos históricos sobre el rendimiento de combustible considerando los siguientes factores de impacto: Peso, modalidad de acople, paso diferencial, tipo de motor, ruta y antigüedad.

En este modelo preliminar las variables en conjunto solamente explicaban el 40.30% (R^2 ajustado) del rendimiento de combustible y mantenían una relación entre sí del 69% .

Es importante señalar que en la selección de la muestra de viajes se consideraron unidades motrices que fueran conducidas por operadores calificados como competentes por la organización y cuyo nivel de mantenimiento había sido efectuado de conformidad a las políticas dentro de la organización y recomendaciones del fabricante del vehículo, estas medidas no garantizaron el resultado esperado para el modelo, ya que este no permitía pronosticar cuando menos un 90% del comportamiento del factor de rendimiento de combustible, sin embargo el modelo tenía significancia estadística al efectuarse la prueba de hipótesis pertinente (Valor P menor al nivel de significancia del 05%).

En relación al resultado de las pruebas de hipótesis se deduce que el paso al diferencial y el tipo de motor con un nivel de confianza del 90% no son variables significativas dentro del modelo. Esto se debe a que la empresa adoptó como

estrategia para optimizar el rendimiento solicitar al proveedor de vehículos pesados la configuración de los mismos de acuerdo a la ruta y la velocidad que se requerirá que cubra la unidad en operación; así mismo se implementó no hacer cambios de rutas entre las unidades, manteniendo en la mayoría de las unidades un sólo tipo de ruta de operación. Es importante destacar, que sin la implementación de estas estrategias o políticas estos factores probablemente resultaría con un alto nivel de significancia (explicación) dentro del modelo de pronóstico de rendimiento de combustible.

Como segunda etapa de esta investigación (artículo capítulo 4), se ejecutó un diseño de experimentos con estas variables y otras más, como la competencia del operador y la conformidad del mantenimiento, bajo condiciones controladas, que permitieran determinar el grado de impacto de cada una de estas variables y discriminar las variables para construir un modelo de rendimiento de combustible definitivo con mayor capacidad explicativa y predictiva, a continuación se describen los aspectos relevantes:

De las variables que se consideraron para el experimento, resultaron tener mayor relevancia: la ruta, la modalidad de acople, la técnica de conducción y la interacción entre la ruta y la conducción, explicando en conjunto un 50% de la variabilidad en el rendimiento del combustible.

En contraste, las características mecánicas de la unidad, la antigüedad y el mantenimiento fueron variables con menor impacto, y con carencia de relevancia estadística para obtener el modelo explicativo del rendimiento de combustible en esta empresa de transporte, esto con un nivel de confianza del 95%.

Los resultados en relación a las características mecánicas de la unidad se deben a los motivos expuestos en relación al primer modelo preliminar (con datos históricos).

De acuerdo al resultado del diseño de experimento factorial 2^k ejecutado en la empresa transportista, las condiciones de operación que optimizan el gasto de

combustible son la ruta llana, técnica de conducción económica conforme y la modalidad de acople sencillo.

En función de los dos modelos preliminares obtenidos se decidió proceder a la última parte de esta investigación (capítulo 5, artículo publicado en revista Nova Scientia), la cual consistió en obtener un modelo estadístico con datos de la empresa transportista aplicando regresión lineal múltiple solamente. Este modelo sobre el rendimiento de combustible resultó significativo (estadísticamente), 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.

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.

Así mismo se presentó a la empresa como anexo, un compendio de mejores prácticas empresariales en relación a la gestión de combustible con enfoque de optimización que sirva de guía para proyectos de mejora.

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.

Como futuras líneas de investigación relacionadas con el tema se establecen las siguientes:

- ✓ Considerar variables que no fueron posible de contemplarse en esta investigación, debido a las características propias de la empresa transportista donde se validó el modelo, tales como, el tráfico, nivel de competencia del operador en cuanto a técnicas económicas de conducción, las condiciones ambientales presentadas durante el viaje, unidades con características mecánicas diferentes, etc.
- ✓ Obtener modelos específicos de rendimiento de combustible para cada tipo de unidad que integre una flota.
- ✓ Desarrollar la automatización de modelos de rendimiento (diseñados bajo condiciones operativas reales y comunes de la industria de transporte) a través de un lenguaje de programación que pueda estar disponible para la aplicación en cualquier empresa 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.

CONUEE. (2013). *Eficiencia energética para el operador profesional*. Recuperado el 20 de Julio del 2013 de http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/transportista_eficiente_1

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.

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, de http://www.la.fnstfreiheit.org/uploads/1198/NaumanCompetitividad_final.pdf

Lucena P. (2011). Volvo lanza en el mercado mexicano la transmisión I-Shift. Recuperado el 11 de Diciembre del 2013, de <http://t21.com.mx/terrestre/2013/08/29/volvo-lanza-mercado-mexicanotransmision-i-shift>

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.(2002), *Diagnósticos Energéticos en Empresas de Autotransporte, Dos casos de Aplicación*. Publicación Técnica No. 171 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., Zavala A. (1999), *Selección del tren motriz vehículos de pesados (carga y pasajeros) destinados al servicio público federal*. Publicación Técnica No. 128 Instituto Mexicano del Transporte.

Rafael, M. , Cervantes J., Lozano A. (2010), *Eficiencia Energética del tren motriz de vehículos pesados con reducción de CO_2* , 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_Co nduccionEficiente_A2005_A_f3817bad.pdf

Vantelon, A. Training operators in technical driving and its influence on fuel consumption. En: XII NATIONAL SYMPOSIUM ON THE RATIONAL USE OF ENERGY (1991: México D.F.).

ANEXO A. CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN



ANEXO B. ACEPTACIÓN DE PUBLICACIÓN

El Martes, 24 de marzo, 2015 18:03:59, Revista Científica Electrónica
<nova_scientia@delasalle.edu.mx> escribió:

Estimada MC Rosa Amelia Alcántar Ruiz:

Hemos tomado una decisión sobre su envío a Nova Scientia, "MODELO ESTADÍSTICO QUE PERMITE OBSERVAR EL IMPACTO DE LOS FACTORES QUE INCIDEN EN EL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE".

Nuestra decisión es: Que se publique en Nova Scientia

Fecha de aceptación: 19/03/2015

Le agradecemos su valiosa contribución y estamos en el compromiso de informar a usted en cuanto su artículo sea publicado en nuestro siguiente número.

José Luis Álvarez Espinosa

Nova Scientia ISSN 2007 - 0705

Indizada en: CONACyT

<http://www.conacyt.mx/index.php/comunicacion/indice-de-revistas-mexicanas-de-investigacion/category/multidisciplinaria>