

Freight vehicle condition monitoring through the availability

Laksmi Penabad-Sanz, Pedro Antonio Rodríguez-Ramos & Arsenio Miguel Iznaga-Benítez

Centro de Estudios de Ingeniería en Mantenimiento, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba. laksmi@mecanica.cujae.edu.cu, parr@ceim.cujae.edu.cu, iznaga@mecanica.cujae.edu.cu

Received: October 27th, 2017. Received in revised form: April 12th, 2018. Accepted: May 2nd, 2018

Abstract

The application of decision making approaches based on systems degradation monitoring in real situations are difficult. Among those difficulties are methods complexity and data, technology and capable personnel availability. In this paper, a way for monitoring freight vehicle condition through availability assessment is proposed. In order to do that, the rational use limit condition of freight vehicles is proposed and a mathematical model of the availability threshold linked with operation economic results is presented. The latest makes possible to value the vehicle operation convenience. The application of the proposal to a fleet shows its possibilities in real conditions. An "Almost perfect" agreement degree between the availability assessment results and the economic result of the vehicle operation was obtained.

Keywords: availability; availability threshold; rational use; transport fleet; decision making.

Monitoreo de la degradación de los vehículos de transporte de cargas a través de la disponibilidad

Resumen

La aplicación de enfoques de toma de decisión basados en el monitoreo de la degradación de los sistemas a situaciones reales presenta un grupo de barreras tales como la complejidad de los métodos, la disponibilidad de datos, tecnología y personal capacitado. En este trabajo se propone una vía para el monitoreo del estado del vehículo de transporte de cargas a través de la disponibilidad. Para ello se introduce la condición límite de uso racional de los vehículos y se presenta la expresión de la disponibilidad límite vinculada a los resultados económicos de la operación del vehículo, lo que posibilita valorar la conveniencia de la operación del mismo. La aplicación de la propuesta a una flota ilustra sus posibilidades en condiciones reales, obteniéndose un grado de acuerdo "Casi perfecto" entre los resultados del análisis de la disponibilidad y el resultado económico de la operación del vehículo.

Palabras clave: disponibilidad; disponibilidad límite; uso racional; flotas de transporte; toma de decisiones.

1. Introducción

Las empresas operadoras de flotas de transporte automotor tienen como principal objetivo la generación de utilidades. Para ello requieren disponer de vehículos en un estado técnico tal que les permita ejecutar la transportación de forma rápida y segura. Sobre el estado técnico de un vehículo influyen sus cualidades inherentes, la logística y el mantenimiento [1], que se manifiesta en la velocidad con la que se desarrollan procesos como el desgaste, la corrosión o la fatiga, entre otros. La influencia de los factores sobre la velocidad con las que se desarrolla el proceso de degradación

es atenuable pero no evitable.

El deterioro del estado técnico limita la capacidad del vehículo de generar utilidades. Por ello, conocer hasta qué punto el deterioro del estado del vehículo es permisible para la empresa resulta importante, ya que le permitiría determinar el momento a partir del cual la continuidad en operación del vehículo debe ser cuestionada. O sea, que se encuentra ante una situación de toma de decisión como el reemplazo, mantenimiento proactivo, la programación de la operación, entre otras.

El estudio de la vinculación de los procesos de degradación de los sistemas a través de indicadores del estado

How to cite: Penabad-Sanz, L., Rodríguez-Ramos, P.A. and Iznaga-Benítez, A.M., Monitoreo de la degradación de los vehículos de transporte de cargas a través de la disponibilidad. DYNA, 85(205), pp. 355-362, June, 2018.

del sistema con las situaciones de toma de decisión se realiza desde varias perspectivas: el mantenimiento basado en el estado (CBM, por sus siglas en inglés); la gestión de activos (GA); y más recientemente, la gestión y pronóstico de la salud de los sistemas (PHM, por sus siglas en inglés). En ellas, un pilar importante es el monitoreo del estado de los activos, de forma continua o a intervalos, a través de indicadores (que Knezevic denomina estimador adecuado de la condición, EAC [1]), lo que muestra la capacidad funcional de los activos y posibilita la toma de decisiones como el diseño del programa de mantenimiento [2], la reparación o el reemplazo [3] o la fiabilidad [4-5], desde el CBM; como la planificación estratégica de las operaciones, mantenimiento e inversiones desde la GA [6]; o para determinar la necesidad de acciones preventivas y correctivas de mantenimiento, optimizar la programación del mantenimiento y de los niveles de repuestos almacenados desde el PHM [7].

Los EAC más empleados suelen ser aquellos que son medidos directamente del sistema como las vibraciones, temperatura, análisis de aceite, entre otros. También se han utilizado EAC indirectos como los parámetros de proceso vinculados con la calidad de los procesos, empleándose las técnicas propias del control estadístico de procesos para establecer los límites de los parámetros y su monitoreo, tanto para parámetros cuantitativos [8-9] como cualitativos [10]. Específicamente en el caso de los vehículos, trabajos como los realizados por Jiang y Shi [11-13] en flotas de transporte muestran la posibilidad de utilizar indicadores de desempeño como EAC.

Lo anterior indica que es posible emplear tanto estimadores directos como indirectos de la condición de un sistema, para los cuales la recolección de los datos se realice a intervalos. El seguimiento del comportamiento de los EAC que se analicen permite, al comparar respecto a un valor límite, evaluar la capacidad del mismo de cumplir con su función y con ello la presencia de una situación de toma de decisión, que están relacionadas con la gestión del mantenimiento del transporte de acuerdo a la definición dada por Nowakowski [14].

El empleo de enfoques de toma de decisión basados en la degradación de los sistemas presenta un conjunto de barreras. Autores como Dekker [15], Van Horenbeek [16], Van de Kerkhof [17] y Tsui [18] en sus revisiones, coinciden en la existencia de una brecha entre la teoría y la práctica, dada por la diferencia entre la gran cantidad de contribuciones realizadas en el nivel teórico y la relativamente poca presencia de aplicaciones en condiciones reales relacionadas con estos temas. Destacan la importancia de acercar las investigaciones en el campo del mantenimiento a las situaciones reales de las organizaciones, teniendo en cuenta los objetivos de los negocios. Según estos autores, la complejidad de los modelos propuestos en las investigaciones limitan las posibilidades de ser comprendidos por aquellos que deben implementarlos en las organizaciones, así como los requerimientos de abundantes datos de calidad. Por tanto, una propuesta aplicable debe ser lo suficientemente sencilla como para emplearse por los operadores de flotas de transporte.

El presente trabajo se centra en proponer una vía para el monitoreo del estado del vehículo, vinculado con los

resultados económicos de la operación del mismo. La propuesta debe ser aplicable en condiciones reales, particularmente en entornos de fuertes restricciones económicas, con bajo nivel tecnológico de la flota y de disponibilidad de datos, como contribución a la reducción de la brecha existente en este sentido.

2. Parámetros para el monitoreo del estado del vehículo

2.1. Selección del EAC

El monitoreo de la degradación de los sistemas requiere de tres definiciones iniciales: los EAC que serán monitoreados, la frecuencia de inspección y los valores límites de los EAC a partir de los cuales la operación de los activos no es permisible [19].

Los EAC directos más conocidos son los análisis de aceite, temperatura, ruido y análisis de los gases de escape. Otros parámetros relacionados con los avances en la electrónica de los vehículos también pueden emplearse. La introducción de la medición de parámetros directos, aunque es más efectiva en la detección, diagnóstico y pronóstico de los estados que suponen una operación no permisible, suele ser costosa y requerir un nivel alto de especialización para el empleo exitoso de estas tecnologías [20-21]. Ello constituye una barrera para la implementación del monitoreo de la degradación de los vehículos y no facilita su introducción en condiciones económicas más restrictivas.

El indicador disponibilidad, junto con el costo y la fiabilidad, es uno de los indicadores más empleados en estudios relacionados con la degradación de los sistemas [2]. Fundamentalmente como criterio de optimización [5,22] y límite de control [22]. No así como EAC, a diferencia de la tasa de fallos [23] o de la fiabilidad [4-5] que sí se han considerado como EAC. No obstante, considerando que el indicador disponibilidad mide la calidad de los equipos que se relaciona con la funcionalidad [24], es ampliamente utilizado y disminuye en la medida que se incrementa el deterioro del activo, se propone como el EAC a emplear.

Con relación a la frecuencia de inspección se hace referencia en la literatura a tres formas fundamentales: continua, con intervalos fijos y con intervalo variable [2]. Los criterios económicos son los que prevalecen a la hora de seleccionar la frecuencia de inspección [2]. La evaluación de la disponibilidad de los vehículos suele realizarse diariamente con el objetivo de asignar el trabajo, también se realiza de forma mensual y anual, en el nivel jerárquico flota, con vistas a la planificación de la operación. La evaluación a intervalo fijo no introduce cambios en los procedimientos para la recolección de los datos lo que no dificulta la introducción de la propuesta ni encarece el procedimiento.

Solo resta la determinación de un límite de referencia que posibilite diferenciar el estado de operación permisible del que no lo es. La disminución de la disponibilidad a valores inferiores al límite, indicaría que la operación del activo no es permisible y de esa forma la presencia de una situación de toma de decisión. A continuación se introduce el límite de uso racional de un vehículo y luego, la obtención de la expresión matemática para la cuantificación de los valores límites de la disponibilidad.

2.2. Límite de uso racional

Las vías para la determinación de los valores límites de los EAC son tres: la experiencia, la modelación matemática por la vía analítica y la modelación matemática por la vía empírica [25]. En el presente trabajo se opta por la vía analítica. La misma precisa de la definición de los criterios con respecto a los cuáles se obtendrán los valores.

La mayor parte de los estudios que se realizan considerando el estado de los vehículos se centran en minimizar los costos de adquisición, operación y mantenimiento basado en la concepción de que el comportamiento del costo es creciente con respecto al uso [26], siendo las medidas del uso más empleadas la edad y el kilometraje acumulado, aunque diversos estudios han demostrado el comportamiento decreciente del costo total con respecto a la edad del vehículo o su kilometraje. Ello se debe a los patrones de preferencia de los usuarios de la flota bajo los cuales vehículos más nuevos o con menor kilometraje son preferentemente empleados [26].

La utilidad o beneficio es sensible a la influencia del deterioro del estado y del patrón de preferencia del usuario, además puede ser directamente asociado a cada vehículo de la flota. A juicio de los autores, es posible considerar la utilidad como un mejor criterio que el costo, con lo que se podría contribuir además, a establecer un vínculo entre la degradación del vehículo y el primer objetivo de todo negocio. En esta dirección, Kochnov y Basté [27] relacionan la disponibilidad de los vehículos con el resultado económico de su operación en la obtención de un valor límite de la disponibilidad con el objetivo de estimar la distancia media que puede recorrer un vehículo entre dos reparaciones generales consecutivas. En esta relación no se consideran las pérdidas que se producen por acciones periódicas de mantenimiento, el tiempo empleado en cuestiones logísticas y administrativas (tiempo en actividades de apoyo al mantenimiento), así como el tiempo inactivo que influyen en el resultado económico de la operación. Tampoco se proveen todas las relaciones matemáticas necesarias para el cálculo de los parámetros económicos. El alcance del índice es limitado no obstante constituye un antecedente importante.

Los sistemas pueden encontrarse en dos estados según la capacidad de cumplir con su función con los parámetros requeridos: estado de funcionamiento y estado de fallo [1]. El estado de funcionamiento se conoce como disponible y el de fallo como fuera de servicio.

En el caso de las flotas de transporte, la asignación de los trabajos de transportación está dada por la conjugación de diversos factores: la irregularidad de la demanda que se manifiesta no solo en fluctuaciones a largo plazo (debido a la tendencia o los cambios estacionales) sino en el corto plazo con diferencias mensuales y diarias [28-29]; la planificación de la operación [30-31]; el tiempo de descanso de los choferes para recuperarse de la fatiga durante la conducción [32]; y las dimensiones de la flota y su composición [29]. Eso significa que un vehículo disponible puede encontrarse en dos estados: trabajando o inactivo. Se entiende por vehículo trabajando al estado en el cual el vehículo se encuentra en alguna de las actividades relacionadas con el proceso de producción. Estas actividades son: en movimiento (posicionamiento para la carga,



Figura 1. Relación entre el estado del vehículo y el resultado económico de la operación.

Fuente: Los autores.

el traslado de la carga y regreso a la base), en las paradas relacionadas con el descanso obligatorio de los choferes, durante la carga/descarga y otros procedimientos (maniobras, documentación, pesaje y expedición) [33-34]. Un vehículo está inactivo cuando estando disponible no se encuentra en alguna de las tareas relacionadas con el proceso de producción.

Desde el punto de vista de económico, con la tenencia de un vehículo se incurren en un grupo de gastos que son fijos, por lo que están presentes en cualquiera de los estados en que este se encuentre.

Un vehículo trabajando genera ingresos que están dados por el valor de servicio realizado. Para la ejecución del servicio consume recursos como el combustible, que dependen del nivel de actividad. Ello conduce a un resultado económico en forma de utilidad o pérdida, según sea el balance entre los ingresos y gastos. Por otro lado, un vehículo que no produce (lo que ocurre en los estados inactivo y fuera de servicio) no genera el beneficio que pudiera esperarse si estuviese trabajando. Este constituye un costo de oportunidad, que conduce a una afectación económica. La Fig. 1 muestra la relación entre los elementos resultantes de este análisis.

De acuerdo a lo mostrado en la Fig. 1, el tiempo trabajado por un vehículo genera beneficios económicos, mientras que el tiempo sin trabajar influye negativamente, provocando una afectación económica. El beneficio económico (BE) por el tiempo trabajado (T_t) de un vehículo se puede expresar según ec. (1), mientras que la afectación económica (AE) por el tiempo no trabajado (T_{nt}) según ec. (2).

$$BE = aT_t \quad (1)$$

$$AE = bT_{nt} \quad (2)$$

Donde a es el beneficio generado por el trabajo del vehículo en la unidad de tiempo, b la afectación económica por no trabajar en la unidad de tiempo y T_{nt} la suma del tiempo inactivo y el tiempo fuera de servicio.

La relación entre estos tiempos se puede expresar teniendo en cuenta un período de estudio o análisis determinado como puede verse en la ec. (3). En un determinado T_p el incremento del tiempo trabajado provoca la disminución del tiempo sin trabajar ya que:

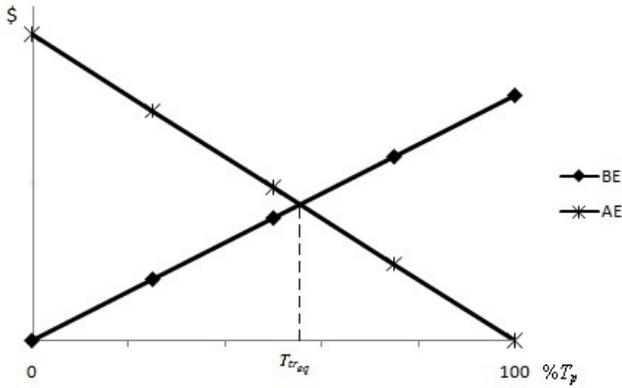


Figura 1. Comportamiento de los beneficios y las afectaciones económicas en función del tiempo trabajado, expresado como porcentaje del tiempo del periodo.
Fuente: Los autores.

$$T_p = T_t + T_{nt} \quad (3)$$

El parámetro a está asociado al beneficio por el trabajo y b se relaciona con el costo de oportunidad por no trabajar y los gastos fijos (de acuerdo a la Fig. 1); considerando el día como unidad de tiempo entonces se obtiene que:

$$a = I_d - v \cdot l_{td} - F_d \quad (4)$$

$$b = I_d - v \cdot l_{td} + F_d \quad (5)$$

Donde:

I_d : Ingreso medio diario del vehículo, \$/d.

v : Costo variable unitario de la operación del vehículo, \$/km.

l_{td} : Distancia media diaria recorrida por el vehículo, km/d.

F_d : Gastos fijos diarios del vehículo, \$/d.

La forma específica en la que se calculan los ingresos y los gastos para la determinación de los parámetros a y b dependen del tipo de medio de transporte de la flota y del servicio al que esté destinada. Por ejemplo flotas de transporte de carga, flotas de arrendamiento, flotas de transporte de pasajeros por ómnibus, etc.

La relación entre el beneficio y la afectación económica en un periodo determinado se muestra en la Figura 1. Al expresar AE en función de T_t se puede constatar que a medida que aumenta el porcentaje del tiempo trabajado en el periodo, BE aumenta mientras que AE disminuye. Por tanto, existe un punto de equilibrio en el cual $BE = AE$.

Al despejar T_t en la relación de equilibrio anterior y dividiendo por T_p se obtiene:

$$\alpha_{aLIM} = \frac{b}{a + b} \quad (6)$$

Donde α_{aLIM} es el coeficiente de aprovechamiento del vehículo correspondiente al punto de equilibrio. Si

$\alpha_a \geq \alpha_{aLIM}$ entonces $BE \geq AE$ (ver Figura 1, en el caso contrario ($\alpha_a < \alpha_{aLIM}$) $BE < AE$). A este valor (α_{aLIM}), que representa el nivel de utilización del vehículo a partir del cual el beneficio económico de su operación es mayor que la afectación por la permanencia del vehículo sin trabajar se le denominará **límite de uso racional**.

2.3. Expresión de la disponibilidad límite

El indicador α_a depende de dos factores: relacionado con la operación de la flota, caracterizada por el coeficiente de salida (α_s) y por su estado técnico, expresado a través de la disponibilidad (α_t), como muestra la siguiente expresión [35].

$$\alpha_a = \alpha_s \cdot \alpha_t \quad (7)$$

El coeficiente de salida es un indicador que muestra el grado de aprovechamiento de los vehículos técnicamente aptos para trabajar [35], caracteriza la Función Operación y se calcula como muestra la ec. (8), mientras que la disponibilidad según (9).

$$\alpha_s = \frac{T_t}{T_p - T_{fs}} \quad (8)$$

$$\alpha_t = \frac{T_p - T_{fs}}{T_p} \quad (9)$$

Donde T_{fs} representa el tiempo fuera de servicio del vehículo

Sustituyendo la ec. (7) en (6) y despejando α_t se obtiene:

$$\alpha_{tLIM} = \frac{b}{\alpha_s(a + b)} \quad \forall \alpha_s \in \left[\frac{b}{a + b}, 1 \right] \quad (10)$$

Donde α_{tLIM} es la disponibilidad límite. Representa límite de uso racional, o sea, el equilibrio entre BE y AE.

El modelo de la ec. (10) muestra una hipérbola con parámetros a y b y α_s como variable independiente. Tanto α_s como α_t tienen significado físico en el intervalo [0;1] (ver ec. (8) y (9)) lo cual restringe el intervalo de valores de α_s .

Un vehículo se encuentra en situación de toma de decisión cuando su uso no es racional. El uso no es racional cuando se cumple que $\alpha_t < \alpha_{tLIM}(\alpha_s)$.

3. Aplicación de la propuesta a una situación real.

3.1. Procedimiento

Los parámetros I_d , v , l_{td} , F_d , que intervienen en el cálculo de a y b para la obtención de la constante de la función α_{tLIM} dependen de características de los vehículos (como el régimen de mantenimiento o los precios de los insumos) y del contexto operacional (distancias entre los orígenes y destinos de la carga o las características de la misma). Por lo que se

Tabla 1.
Niveles para cada tratamiento a contrastar.

Tratamiento	Niveles	Condición
Evaluación de la disponibilidad	Racional	$\alpha_{tij} \geq \alpha_{teq}(\alpha_{sij})_i$
	Irracional	$\alpha_{tij} < \alpha_{teq}(\alpha_{sij})_i$
Evaluación de la condición de equilibrio	Racional	$BE_{Rij} \geq AE_{Rij}$
	Irracional	$BE_{Rij} < AE_{Rij}$

Fuente: Los autores.

puede asumir en el cálculo de α_{tLIM} que vehículos con características similares en condiciones de operación similares tienen el mismo valor de los parámetros de I_d, v, I_{td}, F_d y por consiguiente la misma función límite α_{tLIM} . Lo que significa que los vehículos pueden ser agrupados. Por otro lado, si se desea monitorear el indicador disponibilidad debe disponerse del comportamiento límite (función α_{tLIM}) con anterioridad al análisis de la disponibilidad por lo que el momento para el cálculo es el de la planificación del periodo a monitorear.

Atendiendo a estas dos suposiciones, unidas al hecho de que a través de la vía propuesta se realizan inferencias sobre el resultado económico de la operación de los vehículos a partir del comportamiento de la disponibilidad (los cuales se miden en las escalas diferentes: tiempo en el caso del análisis de la disponibilidad y unidades monetarias en el caso del resultado económico), se consideró pertinente realizar una verificación de la correspondencia entre los resultados del análisis de la disponibilidad y el resultado económico de la operación del vehículo paralelamente a la aplicación. Para ello se empleó el análisis de concordancia que permite cuantificar la medida en la que dos factores coinciden en sus clasificaciones (ver Tabla 1). El primer factor es la evaluación de la disponibilidad con respecto al equilibrio calculado según el modelo propuesto en la ec. (10). El segundo, es la evaluación de la condición de equilibrio con respecto a los beneficios reales (BE_R) aportados por cada vehículo según la ec. (11) y las afectaciones generadas por el tiempo real sin trabajar (AE_R) dado por la ec. (12).

$$BE_{Rij} = I_{ij} - G_{ij} \tag{11}$$

$$AE_{Rij} = b_i + \left(T_{ij} + T_{fsij} \right) \tag{12}$$

Donde:

i: Representa el i-ésimo bloque.

j: representa la j-ésima unidad (vehículo).

I_{ij} : Ingresos reales obtenidos por la operación de la unidad j en el periodo correspondiente al bloque i, \$.

G_{ij} : Gastos directos asociados a la operación de la unidad j en el periodo correspondiente al bloque i, \$.

El procedimiento seguido fue el siguiente:

- 1) Segmentar la flota en bloques homogéneos atendiendo a las características de los vehículos y del contexto operacional.
- 2) Calcular los parámetros del modelo para cada bloque a

partir de los datos de la planificación realizada para el periodo, con lo que se obtiene la función α_{tLIM} . Clasificar los vehículos, según el valor de disponibilidad de cada uno, en el nivel correspondiente (Tabla 1).

- 3) Calcular los beneficios reales por el trabajo y la afectación real por el tiempo sin trabajar de cada vehículo a partir de los datos primarios (registros de operación y mantenimiento), con lo que se evalúa la condición de equilibrio y se clasifican los vehículos según el nivel correspondiente en la Tabla 1.
- 4) Cuantificar, para cada bloque, las coincidencias y discrepancias en las clasificaciones de los vehículos por ambos métodos y resumir en la tabla de contingencia (Tabla 2).

Donde:

n_{ij} : cantidad de unidades que se clasifican en el nivel i según la evaluación del tiempo de trabajo y el nivel j según evaluación de la condición de equilibrio.

$n_{i\bullet}, n_{\bullet j}$: distribuciones marginales

N: total de unidades experimentales.

Evaluar el grado de acuerdo entre los factores: se calcula a través de la medida kappa (κ) [36] según la ec. (13).

$$\kappa = \frac{N \sum_i^l n_{ii} - \sum_i^l n_{i\bullet} n_{\bullet i}}{N^2 - \sum_i^l n_{i\bullet} n_{\bullet i}} \tag{13}$$

La interpretación del resultado de κ se muestra en la Tabla 3.

Esta clasificación se reconoce como arbitraria [37] pero es ampliamente aceptada [36, 38]. No se encontraron estudios que definieran el límite de la fuerza del acuerdo para aceptar los métodos contrastados. Para los efectos de este trabajo se considerará que se acepta método propuesto si $\kappa \geq 0,61$, lo cual significaría que el grado de acuerdo es considerablemente superior respecto al que podría esperarse debido al azar.

3.2. Datos

La flota estudiada cuenta con 37 camiones con los atributos que muestra la Tabla 4. La misma pertenece a una

Tabla 2.
Tabla de contingencia para la evaluación del acuerdo entre los factores.

Evaluación de la disponibilidad	Evaluación de la condición de equilibrio		Total
	Racional	Irracional	
Racional	n_{11}	n_{12}	$n_{1\bullet}$
Irracional	n_{21}	n_{22}	$n_{2\bullet}$
Total	$n_{\bullet 1}$	$n_{\bullet 2}$	N

Fuente: Los autores.

Tabla 3.
Reglas para evaluar el grado de acuerdo.

κ	Dimensión del acuerdo
0	Pobre
0.00-0.20	Pequeño
0.21-0.40	Mediano
0.41-0.60	Moderado
0.61-0.80	Considerable
0.81-1.00	Casi perfecto

Fuente: [36]

Tabla 4.
Composición de la flota.

Bloque	Capacidad de carga (t)	Peso bruto(t)	Nivel de actividad planificado (km)	Tiempo en Operación (años)	Cantidad
A	30	16	135000	8	25
B	30	25	105000	6	12
Total					37

Fuente: Los autores.

Tabla 5.
Valores de los parámetros de la disponibilidad límite.

Bloque	I_d	I_{td}	v	F_d	a	b	$\frac{b}{a+b}$
A	1012.36	473.68	0.44962	43.97	763.61	849.82	0.5267
B	935.03	437.50	0.51267	71.00	649.18	789.45	0.5488

Fuente: Los autores.

empresa que realiza transportaciones a carga completa, que ha sido seleccionada aleatoriamente. El régimen de trabajo es continuo (24 h los 7 días de la semana) en dos turnos de trabajo y un chofer por turno por vehículo.

El plan de transportación y planificación económica junto con la información recogida en los registros de operación y mantenimiento (cartas porte, órdenes de trabajo de mantenimiento y los reportes económicos), en un año de trabajo se emplearon para el cálculo de los parámetros de α_{LIM} .

4. Resultados y discusión

Aplicando el primer paso del procedimiento, se obtuvo la tecnología como criterio relevante para la agrupación de los vehículos, ya que la flota cuenta con vehículos de dos modelos (A y B) que difieren entre sí, por sus características técnicas. El nivel de actividad planificado y el tiempo en operación es igual para cada modelo por lo que no se subdivide. El resto de los factores inciden indistintamente sobre los vehículos por lo que se consideraron aleatorios. Por ende, se segmentó la flota en dos bloques homogéneos (A y B) correspondientes a cada modelo de vehículo.

Los valores calculados de: I_d , v , I_{td} , F_d , así como de a y b , correspondientes a cada bloque se muestran en la Tabla 5. La clasificación obtenida al evaluar la disponibilidad, así como al evaluar la condición de equilibrio se muestra en las Tabla 6 y 7.

En la Tabla 6 se puede observar que la disponibilidad de los vehículos 7, 12, 17 y 22 del bloque A es menor que el límite de uso racional, lo que representa un 16% del bloque. Lo mismo sucede con los vehículos 7, 8, 9, 10 y 12 del bloque B (Tabla 7), representando un 41,66%. Del mismo modo, se puede observar que existe correspondencia con los resultados obtenidos a través de la evaluación de la condición de equilibrio (Tablas 8 y 9). Finalmente, el valor de κ obtenido a través del análisis estadístico para ambos bloques se muestra en la Tabla 10.

Tabla 6.
Clasificación de acuerdo a los tratamientos contrastados del bloque A.

Vehículos	Evaluación de la Disponibilidad				Evaluación de la condición de equilibrio		
	α_t	α_s	α_{lim}	Nivel	BE	AE	Nivel
1	0.93	0.83	0.63	R	229701.60	76170.78	R
2	0.87	0.90	0.58	R	219455.68	72543.60	R
3	0.94	0.91	0.58	R	251495.98	46246.55	R
4	0.93	0.87	0.61	R	246706.42	64382.45	R
5	0.91	0.96	0.55	R	273313.73	40805.78	R
6	0.95	0.89	0.59	R	267010.40	49873.73	R
7	0.37	0.92	0.57	I	63839.82	219444.39	I
8	0.90	0.94	0.56	R	197254.14	51687.32	R
9	0.77	0.93	0.57	R	199895.44	93399.89	R
10	0.96	0.98	0.54	R	267568.80	19949.49	R
11	0.97	0.94	0.56	R	289803.59	28110.65	R
12	0.59	0.80	0.66	I	143487.40	175011.44	I
13	0.83	0.96	0.55	R	252028.96	68009.63	R
14	0.95	0.92	0.57	R	262885.02	41712.57	R
15	0.79	0.93	0.57	R	200583.76	87959.12	R
16	0.94	0.93	0.57	R	234321.25	41712.57	R
17	0.04	0.63	0.84	I	-8991.14	321912.23	I
18	0.93	0.91	0.59	R	251962.11	50780.52	R
19	0.80	0.88	0.60	R	197658.58	98840.66	R
20	0.95	0.95	0.55	R	236274.97	34458.21	R
21	0.97	0.95	0.55	R	282185.13	25390.26	R
22	0.00	0.00	1	I	-15733.40	330980.18	I
23	0.77	0.92	0.57	R	216988.59	97027.07	R
24	0.95	0.99	0.53	R	254769.97	18135.90	R
25	0.82	0.91	0.59	R	239305.72	85238.73	R

R- racional, I- irracional

Fuente: Los autores.

En la Tabla 10, se puede observar el nivel de acuerdo es casi perfecto para ambos bloques por lo que se puede aceptar que no hay diferencias significativas entre los resultados aportados por ambos métodos. Por tanto, la vía propuesta permite realizar inferencias sobre el resultado económico del uso de los vehículos a partir de un indicador relacionado con el estado técnico de los mismos. Se puede afirmar además que la segmentación en bloques y el uso de datos provenientes de la planificación del período no introdujeron errores significativos en la evaluación de los vehículos.

Los resultados muestran que no solo es posible identificar aquellos vehículos que se encuentran en situación de toma de decisión, sino la presencia de situaciones en el nivel jerárquico de flota, como es el caso de la comparación con respecto a los criterios de segmentación. Obsérvese que casi la mitad de los vehículos del bloque B están clasificados en el nivel irracional, lo que sugiere situaciones relacionadas con la tecnología, ya que este grupo tiene menos tiempo en operación y menos nivel de actividad planificado. Este mismo hecho relacionado con el tiempo en operación y el nivel de actividad planificado sugiere además, la presencia de otros patrones de preferencia además del reportado [26].

Tabla 7.
Clasificación de acuerdo a los tratamientos contrastados del bloque B.

Vehículos	Evaluación de la disponibilidad				Evaluación de la condición de equilibrio		
	α_t	α_s	α_{lim}	Nivel	BE	AE	Nivel
1	0.94	0.90	0.60	R	265061.28	52191.21	R
2	0.92	0.93	0.58	R	216514.24	46599.30	R
3	0.92	0.93	0.58	R	212278.68	50327.24	R
4	0.89	0.91	0.60	R	223030.12	66171.00	R
5	0.98	0.95	0.57	R	288874.72	22367.66	R
6	0.97	0.99	0.55	R	191662.83	13979.79	R
7	0.00	0.00	1.00	I	-14475.90	340174.88	I
8	0.00	0.00	1.00	I	-14475.90	340174.88	I
9	0.00	0.00	1.00	I	-14475.90	340174.88	I
10	0.37	0.76	0.71	I	37942.62	244180.33	I
11	0.70	0.92	0.59	R	143738.84	120226.19	R
12	0.25	0.81	0.66	I	30691.00	271207.92	I

R- racional, I- irracional

Fuente: Los autores.

Tabla 8.
Tabla de contingencia para el contraste de los factores del bloque A.

Evaluación de la disponibilidad	Evaluación de la condición de equilibrio		Total
	Racional	Irracional	
Racional	21	0	21
Irracional	0	4	4
Total	21	4	25

Fuente: Los autores.

Tabla 9.
Tabla de contingencia para el contraste de los factores del bloque B.

Evaluación de la disponibilidad	Evaluación de la condición de equilibrio		Total
	Racional	Irracional	
Racional	7	0	7
Irracional	0	5	5
Total	7	5	12

Fuente: Los autores.

Tabla 10.
Resultados del cálculo estadístico.

Bloque	κ	Grado de acuerdo
A	1	Casi perfecto
B	1	Casi perfecto

Fuente: Los autores.

El modelo obtenido (ec. 10) para el cálculo del límite de la disponibilidad se diferencia del mostrado por Kochnov y Basté [27], en el alcance de las pérdidas que considera, dado por la introducción de la variable α_s . Junto con las ec. (4) y (5) constituyen un sistema de ecuaciones algebraicas, la más sencilla de las formulaciones, por lo que no se requieren habilidades especiales en el uso de las matemáticas ni sistemas complejos de procesamiento de datos. Ello unido a que el indicador disponibilidad es uno de los indicadores más utilizados para el control de la actividad de mantenimiento de las flotas, no se requiere instrumentación adicional, y los datos requeridos son básicos en cualquier entorno, hace que sea posible su aplicación en condiciones reales con presencia de restricciones económicas y bajo nivel tecnológico de la flota.

Los parámetros y variables empleados son comunes no solo para flotas de transporte de carga tanto TL como LTL, sino a otras flotas de vehículos automotores como las de alquiler o de transporte de pasajeros, por lo que la aplicación de este modelo es posible que pueda extenderse a estos casos, aunque la dependencia en el cálculo del límite de los ingresos limita el alcance de la aplicación a flotas que pertenecen a empresas proveedoras de servicios de transporte.

Se introduce el término límite de uso racional para referirse al valor del aprovechamiento del vehículo para el cual los beneficios económicos generados por el trabajo de mismo y las afectaciones que se producen por no trabajar se encuentran en equilibrio.

El empleo del día como unidad de tiempo responde a la forma en la que se registra y procesa la información en las bases de transporte disponibles. A criterio de los autores, la hora es una mejor alternativa.

5. Conclusiones

La propuesta de monitorear la degradación de los vehículos de transporte de cargas a través del análisis de la disponibilidad es factible y permite realizar inferencias sobre la permisibilidad de la operación del vehículo con relación a su resultado económico, primer objetivo de todo negocio. Es una propuesta sencilla y su empleo debe contribuir a estrechar la brecha entre teoría y práctica planteada por diversos autores, con relación a los enfoques de toma de decisión basados en la degradación de los sistemas.

La aplicación del método propuesto está limitada a flotas de transporte de cargas que generen ingresos, aunque puede ser extendido a otros tipos de flotas al ser los parámetros y variables empleados, de uso común entre los operadores de flotas.

Bibliografía

- [1] Knesevic, J., Mantenimiento. Madrid, Isdefe, 1996.
- [2] Alaswad, S. and Xiang, Y.-A., Review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system. Reliability Engineering and System Safety, 157, pp. 54-63, 2017. DOI: 10.1016/j.res.2016.08.009
- [3] Ahmad, R. y Kamaruddin, S.-A review of condition-based maintenance decision-making. European Journal of Industrial Engineering, 6(5), pp. 519-541, 2012. DOI: 10.1504/EJIE.2012.048854.
- [4] Zhou, X., Xi, L. y Lee J., Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. Reliability Engineering & System Safety, 92, pp. 530-534, 2007. DOI: 10.1016/j.res.2006.01.006.
- [5] Li, L., You, M. and Ni, J., Reliability-based dynamic maintenance threshold for failure prevention of continuously monitored degrading systems. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 131, pp. 031010-1-031010-9, 2009. DOI: 10.1115/1.3123340.
- [6] Tywoniak, S., Rosqvist, T., Mardiasmo, D. and Kivits, R.-A., Towards an integrated perspective on fleet asset management: engineering and governance considerations. Proceedings of 3rd World Congress on Engineering Asset Management and Intelligent Maintenance Systems Conference (WCEAM-IMS 2008): Engineering Asset Management - A Foundation for Sustainable Development, 2008, pp. 1553-1567.
- [7] Collins, D.-H., Anderson-Cook, C.-M. and Huzurbazar, A.-V., System Health Assessment. Quality Engineering, 23(2), pp. 142-151, 2011. DOI: 10.1080/08982112.2010.529484.
- [8] Panagiotidou, S. and Tagaras, G. Statistical process control and condition-based maintenance, a meaningful relationship through data sharing. Production and Operations Management, 19(2), pp. 156-171,

2010. DOI: 10.3401/poms.1080.01073.
- [9] Xiang, Y., Joint optimization of X control chart and preventive maintenance policies: a discrete-time Markov chain approach. *European Journal of Operational Research*, 229(2013), pp. 382-390, 2013. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.02.041.
- [10] Zhong, J., Ma, Y. and Tu, Y.-L. Integration of SPC and performance maintenance for supply chain system. *International Journal of Production Research*, 54(19), pp. 5932-5945, 2016. DOI: 10.1080/00207543.2016.1189104.
- [11] Jiang, R. and Shi, G., Condition-based vehicle fleet retirement decision, a case study. *International Journal of Performability Engineering*, 6(4), pp. 355-362, 2010.
- [12] Jiang, R. and Shi, G., Development and application of vehicle health index. *Advanced Materials Research*, (118-120), pp. 459-463, 2010. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.118-120.459.
- [13] Jiang, R., An overall performance measure for vehicle retirement decision. *Chemical Engineering Transactions*, 33, pp. 775-780, 2013. DOI: 10.3303/CET1333130.
- [14] Nowakowski, T., Tubis A., and Werbińska-Wojciechowska, S., Maintenance decision making process - a case study of passenger transportation company, en W. Zamojski, et al. *Theory and engineering of complex systems and dependability*, Springer, Brunów. pp. 305-318, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-19216-1_29.
- [15] Dekker, R., Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 51(3), pp. 229-240, 1996.
- [16] Van Horenbeek, A., Pintelon, L. and Muchiri, P., Maintenance optimization models and criteria. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1(3), pp. 189-200, 2010. DOI: 10.1007/s13198-011-0045-x.
- [17] van de Kerkhof, R.-M., Akkermans, H.-A. and Noorderhaven, N.-G., Knowledge lost in data: organizational impediments to condition-based maintenance in the process industry, in *Logistics and Supply Chain Innovation*, Lecture Notes en H. Zijm et. al. *Logistics*, Springer International Publishing: Switzerland, 2016.
- [18] Tsui, K.-L., Chen, N., Zhou, Q., Hai Y. and Wang, W., Prognostics and health management: a review on data driven approaches. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 17 P, 2015. DOI: 10.1155/2015/793161.
- [19] Shin, J.-H. and Jun, H.-B., On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(2015), pp. 119-127, 2015. DOI: 10.1016/j.jcde.2014.12.006.
- [20] Bivona, E. and Montemaggiore, G.-B., Understanding short- and long-term implications of "myopic" fleet maintenance policies: a system dynamics application to a city bus company. *System Dynamics Review*, 26(3), pp. 195-215, 2010. DOI: 10.1002/sdr.450.
- [21] Stecki, J.-S., Rudov-Clark, S. and Stecki, C., The rise and fall of CBM (Condition based Maintenance). *Key Engineering Materials*. 588(2014), pp. 290-301. 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.588.290.
- [22] Liao, H., Elsayed, E.-A. and Chan, L.-Y., Maintenance of continuously monitored degrading systems. *European Journal of Operational Research*, 175(2006), pp. 821-835, 2006. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.05.017.
- [23] Yeh, R.-H. and Chang, W.-L., Optimal threshold value of failure-rate for leased products with preventive maintenance actions. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(2007), pp. 730-737, 2007. DOI: 10.1016/j.mcm.2006.12.001.
- [24] Penabad-Sanz, L., Iznaga-Benítez, A.M. y Rodríguez-Ramos, P.A., Disposición y disponibilidad como indicadores para el transporte. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(4), pp. 64-73, 2016.
- [25] Gerdes, M., Scholz, D. and Galar, D., Effects of condition-based maintenance on costs caused by unscheduled maintenance of aircraft. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 22(4), pp. 394-417, 2016. DOI: 10.1108/JQME-12-2015-0062.
- [26] Parthanadee, P., Buddhakulsomsiri, J. and Chamsethikul, P., A study of replacement rules for a parallel fleet replacement problem based on user preference utilization pattern and alternative fuel considerations. *Computers & Industrial Engineering*, 63(2012), pp. 46-57, 2012. DOI: 10.1016/j.cie.2012.01.011.
- [27] Kochnov, N. y Basté, J., *Reparación de los automóviles*. Vol. 1, La Habana, Cuba: EMPSES, 1986.
- [28] Trompet, M., Anderson, R.J. and Graham, D.J., Variability in comparable performance of urban bus operations. *Transportation Research Record*, December, pp. 177-184, 2009. DOI: 10.3141/2111-20.
- [29] Redmer, A., Strategic vehicle fleet management - the composition problem. *LogForum*, 11(1), pp. 119-126, 2015. DOI: 10.17270/J.LOG.2015.1.11.
- [30] Buchanan, J. and Scott, J. Vehicle utilization at bay of plenty electricity. *Interfaces*, 22(2), pp. 28-35, 1992.
- [31] Lopes-da-Costa-Filho, J.L. and de Athayde-Prata, B., Programação de caminhões de múltiplos tipos no transporte de derivados de petróleo para a construção de rodovias. *Journal of Transport Literature*, 9(2), 2015. DOI: 10.1590/2238-1031.jtl.v9n2a11.
- [32] Goel, A., A mixed integer programming formulation and effective cuts for minimising schedule durations of Australian truck drivers. *Journal of Scheduling*, 15(6), pp. 733-741, 2012. DOI: 10.1007/s10951-012-0282-0.
- [33] McKinnon, A., Synchronised auditing of truck utilisation and energy efficiency: a review of the British Government's transport KPI programme, en *World Conference on Transport Research*. University of California, Berkeley, 2007.
- [34] Alves, R.T., Fiedler, N.C, da Silva, E.N., da Silva-Lopes, E. and do Carmo, F.C.d.A., Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares. *Revista Árvore*, 37, pp. 897-904, 2013.
- [35] Afanasiev, L.L., et al, *Sistema único de transportación y transportaciones por vehículos automotores*. Moscú: Transport. 1984.
- [36] Everitt, B.S., *The analysis of contingency tables*. CRC Press.1992
- [37] Landis, J. and Koch, G., The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, pp. 159-74, 1977.
- [38] López-de-Ullibarri-Galparsoro, I. y Pita-Fernández, S., Medidas de concordancia: el coeficiente kappa. *Cad aten primaria*, 6, pp. 169-171, 1999.

L. Penabad-Sanz, es graduada de Ing. Mecánica en 1999, Ing. Industrial en 2009 y MSc. en Gestión Integral del Transporte, Mención Automotor en 2011, todos en la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cuba, es profesora auxiliar en el Centro de Estudios de Ingeniería en Mantenimiento (CEIM) de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cuba. Dirige e investiga en proyectos relacionados con la operación y mantenimiento de flotas de transporte, particularmente, gestión del mantenimiento, evaluación tecnológica de los vehículos y del mantenimiento automotor.
ORCID: 0000-0001-9106-2087

P.A. Rodríguez-Ramos, es graduado de Ing. del Transporte Marítimo en 1977, de MSc. en Explotación de la Flota en 1977 y de Dr. en Ciencias en Gestión del Transporte Marítimo en 1986, todos en la Universidad Marítima de Odesa. Ucrania. Desde 1977 a 2017, trabaja en la Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba. Actualmente, es profesor titular, tiempo completo, en el Centro de Estudios de Ingeniería en Mantenimiento (CEIM) de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Las líneas investigativas de interés incluyen: análisis de ciclo de vida, gestión del mantenimiento, gestión medioambiental, gestión de la calidad, análisis de factibilidad económica. Actualmente trabaja en varios programas y proyectos vinculados a estas líneas.
ORCID: 0000-0003-2862-0984

A.M. Iznaga-Benítez, es graduado de Ing. Mecánico en 1984, Universidad Politécnica de la Habana José A. Echeverría (Cujae), Cuba, MSc. en Ciencias de la Ingeniería Agrícola en 1997 en la Universidad Estatal de Campinas, São Paulo, Brasil y Dr. en Ciencias Técnicas en 2001, Cujae, Cuba. Más de veinticinco años de experiencia profesional ejerciendo cátedra universitaria y participando en la solución de problemas de investigación y desarrollo en las ramas del azúcar, el petróleo, la salud y la sideromecánica entre otras, incluyendo la formación de personal técnico especializado. Investiga en temas relacionados con la gestión del mantenimiento, la gestión de activos e ingeniería biomédica.
ORCID: 0000-0001-6409-9044