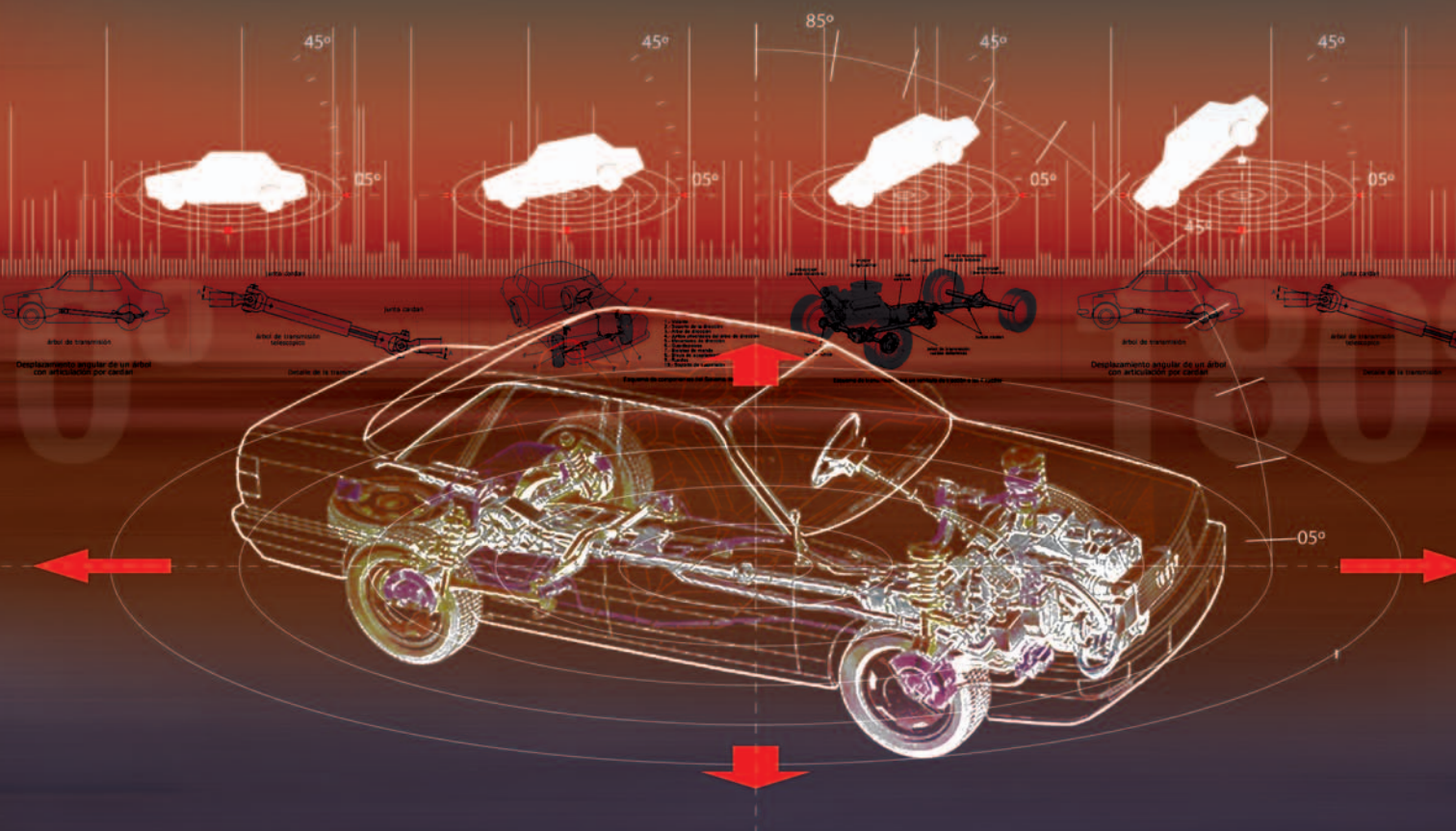




Análisis físico del vuelco en los vehículos petroleros

Por el **Ing. Eduardo H. D'Elía** (Petrobras Energía) y el **Ing. Roberto Piloñeta** (Iram)

La información obtenida en este trabajo nunca había sido revelada en el país ni por las compañías automotrices ni por las aseguradoras, y ha servido para conocer más profundamente los riesgos de la conducción de vehículos petroleros.

El equipamiento de un vehículo en cuanto a su tendencia al vuelco nos está informando sobre un elemento no considerado hasta el presente, como lo es el desplazamiento lateral y vertical del centro de gravedad, que hace que el rodado experimente tendencia marcada de volcar hacia uno de los laterales.

Cuando uno lee el manual del propietario de un vehículo utilitario usado en la industria petrolera, encontrará toda la información que la compañía automotriz le quiere dar, como la máxima capacidad de combustible, la máxima capacidad de pasaje, la máxima carga admisible, etc.

La actividad petrolera ha ido más allá de las previsiones establecidas por las fábricas de automóviles, sobre todo en utilitarios, introduciendo modificaciones importantes en la geometría volumétrica y en la distribución del peso.

Algunas de las modificaciones más comunes inducidas son:

- Jaula antivuelco.
- Cambio de ubicación de un auxilio bajo caja a dos sobre la caja.
- Caja de herramientas en la caja de carga.
- Equipo de soldar.
- Tanque suplementario.
- Combinación de estas.
- Otras.

Estas alteraciones en las masas solidarias al rodado son una parte de la incógnita a develar. Además hay que sumarles la masa del conductor y los pasajeros, que tan pocas veces se tienen en cuenta. Todo esto redundará sin duda en una alteración del centro de gravedad, y cuantificar este desvío es el punto que se intentó abordar en este trabajo.

El hecho de conocer el centro de gravedad nos permite analizar al vehículo como un cuerpo geométrico, el cual tiene un comportamiento conocido al aplicarle una fuerza que tiende a provocarle un equilibrio inestable y el consecuente vuelco.

En el trabajo para los cálculos, los efectos de movimiento de la suspensión, movimiento de los neumáticos y el sistema de estabilidad mecánico fueron obviados. La suspensión y movimientos del neumático en determinadas condiciones probablemente aumentarían la tendencia al vuelco, mientras el sistema de estabilidad electrónico o mecánico trabajaría en forma inversa.

El planteo metodológico adoptado fue el de obtener por medio del pesaje de un parque de vehículos utilitarios más comunes en marcas y modelos, los nuevos centros de gravedad con las configuraciones reales.

Por razones obvias no se dan a conocer las marcas y modelos de los vehículos analizados, pero sí se pretende a través de las conclusiones comprender y hasta esclarecer paradigmas que nos han sido incorporados con el tiempo.

Con respecto a la mecánica del vuelco puede afirmarse que éste sobreviene en la condición límite, cuando el trabajo de las fuerzas laterales es mayor al trabajo de la fuerza peso.

Por esto se sometieron los resultados a una comparación teórica, que permitiera simular un desplazamiento lateral con entidad para transformar toda la energía cinética en energía potencial. Resulta necesario estudiar la influencia que ejercen las modificaciones del equipamiento operativo sobre la velocidad mínima para llegar al punto de equilibrio inestable.

1. Aspectos inherentes al vuelco

El vuelco de un vehículo es un accidente muy peculiar, debido a que normalmente no involucra a otro vehículo:

simplemente el conductor se muestra imprudente al manejar o bien el camino presenta dificultades extremas que provocan que el vehículo salga de control y finalmente vuelque. Más del 90% de los vuelcos se presentan al abandonar la ruta, lo cual no quiere decir que sucedan al manejar en caminos secundarios o de tierra, realmente significa que la mayoría de estos accidentes se producen justo después de haber perdido el control del vehículo y salirse del camino.

El vuelco no es el accidente más común, sólo representa el 2,5% de los accidentes. Sin embargo, si consideramos los accidentes fatales obtiene el 32%, siendo únicamente superado por los accidentes frontales. Es decir, uno de cada tres accidentes fatales sucede en el vuelco de un vehículo.

No todos los vehículos tienen la misma probabilidad de volcarse, existen ciertas características que determinan si un vehículo puede volcarse fácilmente o no. La geometría del vehículo y su energía al momento del vuelco son dos de las principales causas físicas intervinientes.

a) Factor de Estabilidad Estático (FEE)

Existe una manera de medir el riesgo al vuelco de un vehículo y es a través del Factor de Estabilidad Estático (FEE), parámetro usado por la Administración Nacional de la Seguridad en el Tráfico de Carretera (NHTSA) del Departamento de Transporte del gobierno de los EEUU.

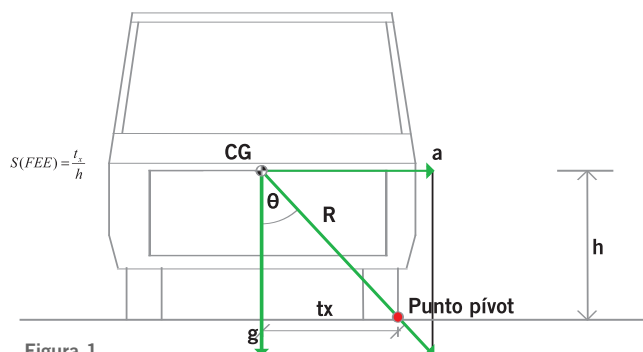
Se sabe que el medioambiente, el camino y los factores del conductor aportan al riesgo del vuelco, por lo tanto han sido descartados de este análisis. Por ejemplo, algunos vehículos con un FEE bajo pueden ser usados en los caminos encorvados o por choferes inexpertos, y aumentar las condiciones de riesgo del vuelco.

Por consiguiente, a la descripción de la asociación entre el FEE y riesgo del vuelco se le deben desestimar las habilidades del conductor y las condiciones externas al vehículo; de esta manera veremos cómo los vehículos con FEE bajo deben ser usados de forma diferente que los vehículos con FEE alto.

En la figura 1 se pueden ver los vectores actuantes ante un desplazamiento lateral: la aceleración "a" que se dirige horizontalmente y la fuerza gravitatoria "g" de dirección vertical.

El vehículo iniciará el vuelco sobre el punto pivot ubicado en la parte externa del neumático cuando la resultante se proyecte más allá de él.

Al ángulo de inclinación lo llamaremos θ y la dirección



estará dada por la ecuación:

$$\tan \theta = \frac{a}{g}$$

El parámetro Factor de Estabilidad Estático (FEE o SSF en inglés) se le asigna a cada vehículo y se define como el cociente entre la distancia de la proyección vertical de centro de gravedad al punto pivó “ t_x ”, y la altura del centro de gravedad (CG) al piso “ h ”.

Pero esta definición ha recibido objeciones por parte de las terminales de automotores, aduciendo que su resultado no se refleja en los hechos.

En cambio, los fabricantes proponen una maniobra que denominan la “maniobra de gancho” con velocidades de hasta 80 km/h, por considerarla un ensayo más objetivo. Es interés de este análisis comparar en una segunda etapa el FEE con la “maniobra de gancho”.

Se tomaron dos elementos de referencia para el análisis del FEE:

- El aporte bibliográfico¹, del que surge la altura del centro de gravedad para vehículos utilitarios del tipo de los estudiados en el orden de entre 30 y 35 pulgadas, es decir $h=0,85$ m.
- Las tablas A-1/2/3/4/5² del apéndice Asociación entre el Vuelco y el FEE, en donde pueden compararse por marca y modelo vehículos muestreados con sus pares comercializados en los EEUU.

Estos datos sirvieron de orientación para juzgar el posible desvío en los resultados obtenidos.

En nuestro caso se ha diferido ligeramente de lo establecido por la NHTSA, que toma el centro medio del vehículo como factor de referencia “ t ” hasta el punto pivó, habiéndose comprobado que no se cumple esta situación en los casos reales.

De los vehículos analizados, sólo un pequeño porcentaje cumplió con la condición en la cual el CG estaba ubicado en la línea media longitudinal. El peso del chofer, el combustible y la asimetría propia del vehículo mostró un FEE diferente hacia la derecha que hacia la izquierda.

En el gráfico 1 se ha descrito la relación entre el FEE y la probabilidad de vuelco. Esta curva es estadística y obedece a una fórmula matemática: $13.25 \times e^{(-3.3731 \times S)}$.

En donde “ s ” = FEE

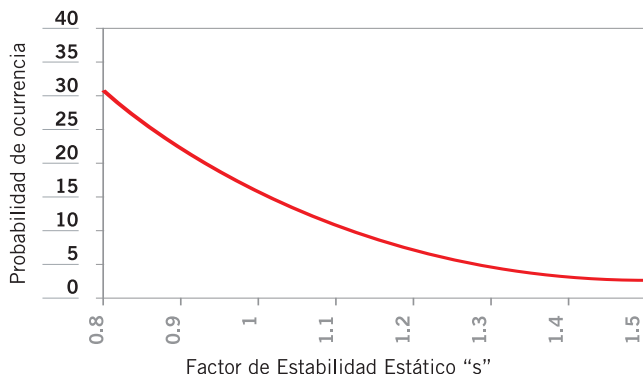


Gráfico 1. Curva de probabilidad estadística
National Highway Traffic Safety Administration

Se llegó a este modelo matemático luego del análisis de 184.726 vuelcos ocurridos en seis estados de los EEUU, de los cuales sólo se tomaron 481 como referentes.

Nótese cómo una disminución del FEE conduce a un aumento probabilístico de la ocurrencia del vuelco.

Un vehículo con un FEE 1,1 tiene el doble de probabilidades de volcar que uno con un FEE 1,3; de la misma manera uno con un FEE 0,9 tiene el doble de otro con 1,1.

Estos casos seleccionados respondían a los cinco patrones considerados de mayor riesgo:

- Accidentes ocurridos a más de 60 km/h.
- Muertes en accidentes en una curva.
- Conductor masculino.
- Conductor menor de 25 años de edad.
- Conductor bajo los efectos del alcohol o drogas.

b) Velocidad crítica de vuelco (Vc)

El vuelco es la consecuencia de un mecanismo dinámico influenciado por múltiples factores. Para establecer un modelo de fácil interpretación es preciso plantear ciertas hipótesis. Tales suposiciones asumen al vehículo como un cuerpo rígido, lo que implica tomar también como rígido al sistema de suspensión, incluso a los propios neumáticos.

Ahora nos abocamos al tratamiento del vuelco en sí mismo. Se requiere pues liberar una cantidad de energía capaz de realizar un trabajo con las consecuencias del vuelco. En efecto, el trabajo de volcadura se realiza a expensas de un umbral de energía cinética (E_c) del rodado, que debe vencer el trabajo de la fuerza peso para elevar al centro de gravedad hasta una posición que pase por la vertical del punto pivó ($P.\Delta h$), es decir, el exterior de la rueda pivó, y realizar el trabajo de desplazar horizontalmente el centro de gravedad del rodado.

$$E_c > P.\Delta h \quad (a)$$

Donde: E_c = energía cinética del vehículo debida a la velocidad de derrape;

$P = m.g$ la fuerza peso;

$$E_c = \frac{1}{2} m.V^2$$

V = velocidad transversal o de derrape.

Al iniciarse el vuelco, la energía debida a la velocidad transversal produce el trabajo de elevación, desde la altura h hasta elevar el centro de gravedad del rodado a la posición de vuelco inminente o equilibrio inestable.

$$\frac{m.V^2}{2} = m.g.\Delta h$$

Se plantea la igualdad y se reemplaza:

$$\frac{m.V^2}{2} = m.g.R - m.g.h \quad (b)$$

La energía cinética interviene como una fuerza viva que actúa lateralmente, con capacidad de producir un trabajo. Luego, despejando y multiplicando por el factor 3,6 se tiene una expresión para la velocidad umbral de derrape en km/h:

$$V_c = 3,6 \sqrt{2.g \left(\sqrt{t_x^2 + h^2} - h \right)} \quad (c)$$

V_c = velocidad de derrape crítica.

La ecuación (c), en efecto, permite calcular la velocidad de derrape a partir de la proyección horizontal del centro de gravedad t_x , a uno de los laterales del vehículo y la altura misma del propio centro de gravedad h , datos estos propios de cada vehículo.

Las variables aplicadas en la expresión (c) pueden apreciarse más claramente en la figura 2:

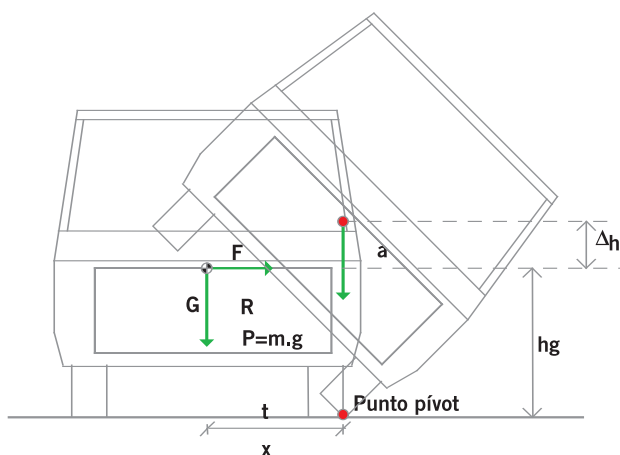


Figura 2

A partir de (c) hemos podido graficar la variación de la velocidad crítica de vuelco en función de la altura del centro de gravedad para distintos valores de t_x , como muestra el gráfico 2.

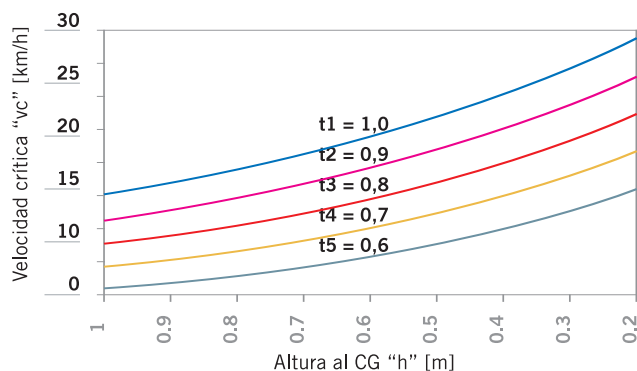


Gráfico 2

En el Gráfico 3 podemos apreciar la velocidad crítica de vuelco " V_c ", esta vez en función de la distancia del CG al punto pivote " t_x " para distintos valores de altura al CG " h ":

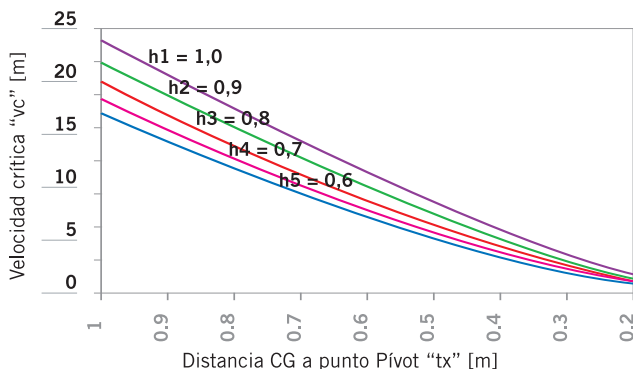


Gráfico 3

de carga, tanque suplementario, etc. A todos ellos se les consideró un chofer de 100 kg de peso y el tanque de combustible lleno.

Se trató de tomar una muestra que representara a la mayoría de las marcas y modelos que Petrobras Energía SA y sus contratistas poseen en la operación de las áreas Santa Cruz I y Santa Cruz II, tanto los equipados para la actividad petrolera como los vehículos 0 km con equipamiento estándar, tal como son entregados en fábrica.

Se muestrearon 14 vehículos en total: dos de los denominados SUV (*Sport Utility Vehicle*) y 12 camionetas, tres de las cuales eran 0 km.

b) Mediciones:

Se identificó mediante marcas sobre cada vehículo la altura de 1000 mm desde el piso. En un total de ocho, se distribuyeron sobre la vertical de cada una de las cuatro ruedas, en el tramo medio de cada lateral entre los ejes y dos en la tapa de la caja de carga.



2. Metodología de campo

a) Muestra:

Los vehículos seleccionados para la determinación del centro de gravedad (CG) contaban al momento de la determinación con todo el equipo con que normalmente circulan por las rutas y caminos de operación, como ser jaulas antivuelco, cajas de herramientas, auxilios en la caja

La demarcación permitía ver las deformaciones que sufría el vehículo con respecto a la línea de centro de ejes al realizarle los pesajes inclinados.

Debido a que el vehículo fue considerado para este estudio como un cuerpo geométrico rígido, las deformaciones resultantes en el pesaje inclinado provocarían una deformación sobre la geometría a tener en cuenta a la hora de los cálculos. Se tomó la distancia externa entre ejes, la cual no difiere de lo indicado en el manual del fabricante.

La distancia o trocha que separa las ruedas es tomada desde el extremo externo de la pisada del neumático hasta el extremo externo de la pisada del neumático paralelo. Las medidas se hicieron tanto para el tren delantero como para el trasero, debido a que existen según la marca y el modelo diferencias importantes.

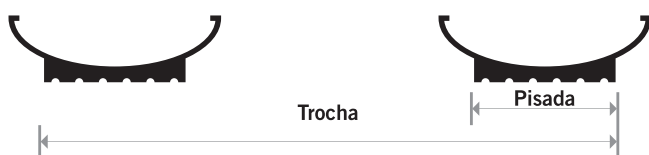


Figura 3

Se tomó como pisada lo que efectivamente hace contacto con el piso, tal como se indica en la figura 3.

Los vehículos fueron fotografiados en sus laterales, frentes y cola en todas las posiciones de pesaje. La cámara digital utilizada es una Olympus D-520 y se empleó una resolución de 0,786 megapixel.

Todas las fotografías de los vehículos fueron referenciadas a escala real en forma vertical y horizontal mediante miras de topógrafo de 4 y 5 m respectivamente.

Se realizó un inventario del equipamiento adicionado al original. Cada equipo adicionado fue medido y registrado fotográficamente.

El conductor fue pesado y por razones de seguridad, durante los pesajes inclinados, su peso fue reemplazado en el asiento por bolsas de cloruro de potasio de 25 kg, manteniendo el mismo peso y el centro de gravedad a la altura de su abdomen.

Se empleó una balanza del tipo digital marca Moretti modelo 7500, con una precisión de ± 5 kg.

c) Pesajes

Antes de cada registro se realizó un cero a la balanza y los pesajes realizados a los vehículos fueron los siguientes:

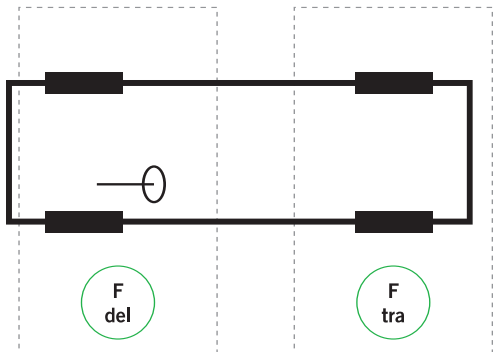
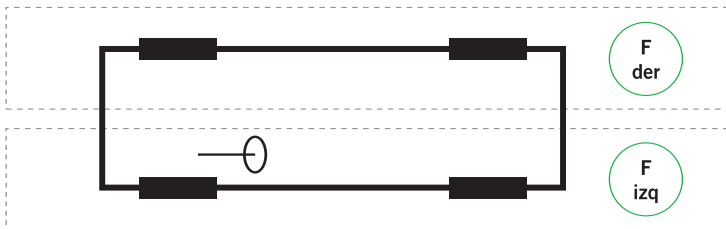




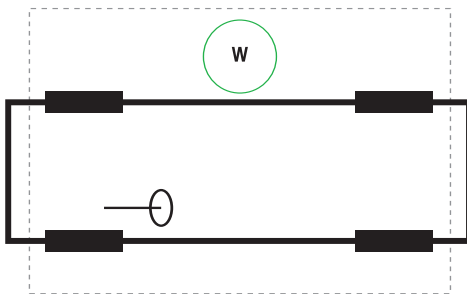
Peso lateral derecho e izquierdo



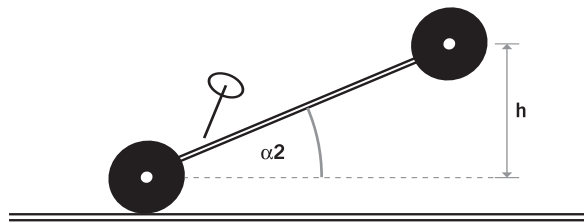
Peso eje delantero y trasero



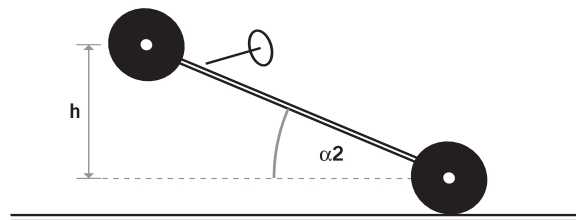
Peso total.



Peso eje delantero con ángulo $\alpha 1$.



Peso eje trasero con ángulo $\alpha 2$.



Observaciones de interés

Un resultado destacable fue el hallazgo del desplazamiento del centro de gravedad hacia uno de los laterales,

para los vehículos de la muestra. Esta situación se halla determinada por la disposición del tanque de combustible (los vehículos analizados tenían carga completa de com-

bustible); el peso del conductor; la disposición de los acompañantes, su número y peso; la disposición, ubicación y peso de los equipos auxiliares.

En la siguiente tabla podemos comparar dos ejemplares del mismo modelo de camioneta doble tracción, una 0 km con equipamiento estándar y otra con el habitual de la actividad petrolera, con un chofer y sin acompañantes en ambos casos.

	0 km	Equipada
Vc derecha	8,99	8,23
Vc izquierda	8,88	8,72
FEE derecho	1,08	0,91
FEE izquierdo	1,06	1,00
Tanque de combustible	32 litros derecha	70 litros derecha
Jaula antivuelco	No	Sí
Conductor	100 kg	100 kg
Acompañantes	No	No
Auxilios	Uno bajo caja de carga	Dos laterales sobre caja
Caja herramientas	No	Sí
Cabina	Doble	Doble
Tracción	4x4	4x4

Si nos referimos a la curva de probabilidad del gráfico 4, veremos cómo en la camioneta equipada la probabilidad de vuelco hacia la derecha aumenta de 6,5% a 26,2% con respecto a la izquierda.

Este número se incrementa aun más con el solo hecho de aumentar la carga con dos pasajeros ubicados a la derecha. El dato es revelador, pues el modelo físico muestra que al estudiar el efecto de una acción lateral por la altura del centro de gravedad, éste es contrarrestado por el momento resistente de la reacción de las ruedas de apoyo, es decir, el lado contrario. Si el centro de gravedad de un rodado está desplazado hacia la derecha por ejemplo, y el vehículo experimentara una tendencia a la rotación hacia el mismo lado, el menor brazo del par resistente ejerce un efecto disminuido para neutralizar el momento de acción de una fuerza de igual intensidad que proviniera del sector izquierdo, ya que al poseer mayor brazo resistente ejercería mayor capacidad de neutralización.

En relación con los sistemas de suspensión de los vehículos estudiados, fue observado un rodado con una disposición simétrica de los amortiguadores de tren posterior, donde el amortiguador izquierdo está vinculado al casco en un punto anterior al eje, en tanto que el amortiguador derecho lo hace en un punto posterior al mismo eje. Este recurso obedece a un intento del fabricante por reducir el efecto de movimiento lateral de la carrocería respecto del tren posterior. De todas maneras, hacen falta resultados experimentales para dictaminar sobre la eficacia del recurso que se describe.

La muestra permitió apreciar otro equipamiento que es importante resaltar. Se registró un vehículo con cabina completa que cuenta con barra estabilizadora en el eje posterior y barra Panhard en el mismo eje. La barra estabilizadora ejer-

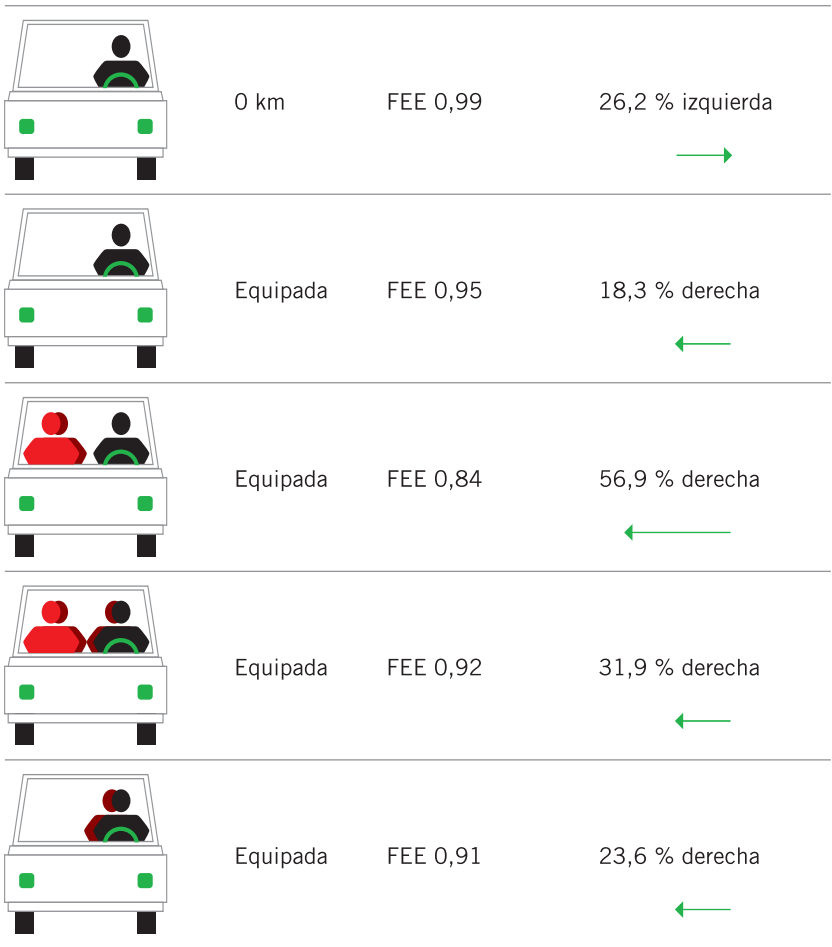


Gráfico 4

ce el efecto de armonizar el movimiento de las ruedas y el eje al que se vinculan, para evitar de este modo el balanceo lateral de la carrocería respecto del eje. Por su lado, la barra Panhard es un recurso muy difundido en el deporte automotor por su efectiva acción de limitar el desplazamiento lateral de la carrocería en relación con el eje posterior. Ambos recursos aplicados conjuntamente evidencian el acento puesto por el fabricante en la estabilidad del automotor.

No debe perderse de vista la configuración del tren posterior, aspecto sobre el que los fabricantes proponen arreglos en la búsqueda de respuestas de mayor estabilidad dinámica. En efecto, los derrapes están influenciados por la tendencia de los vehículos a movimientos laterales de la carrocería respecto de los neumáticos en rodadura. Cuando la carrocería se acelera lateralmente puede producir dos efectos: uno es la tendencia a derrapar, conocido como comportamiento sobrevirante del vehículo; lo contrario es la tendencia a continuar la línea recta aún en curvas, conocido como comportamiento subvirante. Es importante dejar prevista, a propósito de este trabajo, la necesidad de estudiar las dos condiciones mencionadas en ensayos de desempeño reales, con equipamiento típico de vehículos petroleros, para llegar por prueba y error a una distribución de carga y configuración de suspensión que posibilite reducir las causas estructurales de los vuelcos.

Conclusiones

La información obtenida en este trabajo nunca había sido revelada en el país ni por las compañías automotrices ni por las aseguradoras, y ha servido para conocer más profundamente los riesgos de la conducción de vehículos petroleros.

El equipamiento de un vehículo en cuanto a su tendencia al vuelco nos está informando sobre un elemento no considerado hasta el presente, como lo es el desplazamiento lateral y vertical del centro de gravedad, que hace que el rodado experimente tendencia marcada de volcar hacia uno de los laterales.

Esta situación se agrava cuando se le agrega carga (pasajeros u objetos) sin tener en cuenta su distribución, que es particular para cada marca y modelo. Incluso las cargas bien distribuidas pero sobre los 750 mm promedio de altura del piso (h) hacen decrecer el FEE.

Está claro que el FEE incide en la seguridad del vehículo, pero no debe ser tomado como único parámetro, ni tampoco como elemento descalificador ante la comparación de un vehículo u otro. Esto debe tenerse en cuenta, ya que no es lo mismo conducir un vehículo con un FEE 1,5 que otro con 1,0 y como hemos visto tampoco es igual la estabilidad a la derecha y a la izquierda en un mismo vehículo. ■

Notas

1. Gillespie, Thomas D., *Fundamentals of vehicle dynamics*, SAE, 1992, p. 312.
2. Fuente: *The National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) of the Department of Transportation of the United States*.

Agradecimientos

Se ha tratado de interesar a las terminales automotrices en el diseño de un vehículo adaptado a la actividad petrolera que contemple el equipamiento característico, dotado de sistemas de suspensión y mecanismos de seguridad activa capaces de reducir los riesgos de vuelco. Por el aporte de equipos sin los cuales no hubiera sido posible este trabajo:

Gerardo Borroni, Agrimensura & Topografía
KESEN - Empresa de Transportes Especiales
Pride Internacional SRL - Servicios de Perforación
SG - Transporte de LPG
SWACO de Argentina SA - Drilling Fluidos

Por el aporte de vehículos:

Auto Stop - Concesionario Ford Chevrolet
Bertacca SA - Servicios y Construcciones
Geolog SA - Well Testing Service
Oscar Núñez - Alquiler de Vehículos
Petrobras Energía SA - Compañía Petrolera
SKANSKA SA - Servicios
TSUYOI - Concesionario TOYOTA