

## MODELO DE CONTROL EN LÍNEA DE PROBABILIDAD DE VUELCO DE VEHÍCULOS PESADOS

Tomás Echaveguren, Universidad de Concepción, techaveg@udec.cl

Pedro González, Movismart Spa pgonzalez@movismart.cl

Pablo Cartes, Universidad de Concepción, pablocartes@udec.cl

### RESUMEN

El vuelco es un detonante de siniestros de tránsito que afecta a vehículos con centro de gravedad elevado. Depende de la velocidad, del radio de curvatura, de la geometría del vehículo y de su carga. Afecta principalmente a vehículos pesados. Los sistemas de detección en línea requieren modelos de detección de geometría y de probabilidad de vuelco. El artículo resume el desarrollo de estos modelos, incluyendo un modelo de control de calidad para detectar mal funcionamiento de los modelos. Actualmente se encuentra en desarrollo la implementación de un modelo de simulación para posteriormente desarrollar un sistema de testeo a escala real.

*Palabras clave: vuelco, vehículos pesados, control en línea*

### SUMMARY

Rollover triggers traffic accidents affecting vehicles with a high center of gravity. Rollover depends on the speed, the radius of curvature, vehicle geometry, and load. It mainly affects heavy vehicles. Online detection systems require geometry detection and rollover probability models. The paper summarizes the development of these models, including a quality control model to detect model malfunction. Currently under development is implementing a simulation model to develop a full-scale testing system later.

*Key words: rollover, heavy vehicles, control en línea*

## 1 INTRODUCCIÓN

El vuelco es un mecanismo detonante de siniestros de tránsito que afecta a vehículos cuyo centro de gravedad es elevado. Se produce cuando las aceleraciones laterales experimentadas por un vehículo en una curva exceden ciertos umbrales de aceleración. Cruz y Echaveguren (2019), determinaron que la probabilidad de vuelco de vehículos pesados depende de la geometría de las curvas horizontales, de su peralte, y de la velocidad con que el vehículo ingresa a una curva. Por el lado del diseño vial, el modelo de Cruz y Echaveguren (2019) permite determinar radios mínimos y/o límites de velocidad a señalizar para una determinada probabilidad de vuelco. Sin embargo, este enfoque de análisis es fuera de línea y tiene una mayor aplicación al diseño vial.

Una medida de refuerzo de seguridad es dotar a los vehículos pesados de dispositivos de alerta en línea, de manera de informar al conductor que al enfrentar una determinada curva debe reducir su velocidad. Para que este tipo de tecnologías pueda operar, se requieren sistemas basados en la tecnología GPS (Sistema de Posicionamiento Global) con más prestaciones que las otorgadas por los sistemas de control de flota tradicionales. A diferencia del enfoque fuera de línea, el sistema de alerta en línea permite evaluar la compatibilidad del diseño geométrico con la velocidad de circulación, logrando así sugerir velocidades de circulación segura.

Los modelos de vuelco se clasifican en estáticos y dinámicos. Los modelos estáticos estiman el umbral de aceleración lateral que puede sostener un vehículo en una curva sin experimentar vuelco. Este umbral se estima como la razón entre la aceleración lateral límite y la aceleración de gravedad. Estos modelos consideran las características geométricas del vehículo (trocha y altura del centro de gravedad), del camino (peralte y radio) y en algunos casos la suspensión del vehículo (altura del centro de balanceo y tasa de rotación) (Hac, 2002, García et al., 2003, Kühn, 2013). Los modelos dinámicos estiman el vuelco en condiciones reales de operación. Incorporan la dinámica del vehículo con modelos matemáticos complejos que estiman índices de vuelco o lo predicen para mejorar los sistemas automáticos que controlan la estabilidad del vehículo en línea, en especial de vehículos pesados (Alberding *et al.*, 2014 y Huang *et al.*, 2012). Los modelos estáticos se utilizan preferentemente para análisis de vuelco fuera de línea, en tanto que los dinámicos para análisis en línea.

En este trabajo se describen los modelos de un sistema de control en línea del vuelco de vehículos pesados. Primero se desarrollan los modelos de detección de geometría en línea. Posteriormente se desarrolla el modelo de alerta de vuelco de Choi (2008) incluyendo la adaptación a Chile de Valeria (2019). Se desarrolla también el modelo de incremento de velocidad en pendientes descendentes basado en los modelos de Bowman (1989) y Echaveguren y Vargas (2013), considerando que puede incrementar la probabilidad de vuelco por aumento de la velocidad de entrada a curvas horizontales. Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo.

## 2 MODELO PARA LA DETECCIÓN EN LÍNEA DE LA GEOMETRÍA

La geometría de la carretera es el principal dato de entrada para detectar la probabilidad de vuelco. Para ello, se requiere detectar en línea la trayectoria del vehículo y la cota de elevación de un punto de referencia del vehículo. Con esto se obtiene la ubicación de elementos geométricos, sus parámetros y la velocidad de circulación del vehículo.

Esta detección se realiza mediante un GPS montado en el vehículo con una base fija. A partir de las coordenadas adquiridas del GPS. Los elementos a detectar en cada pasada son las curvas horizontales, las rectas, las pendientes y la inclinación de las pendientes. En cada pasada de un vehículo instrumentado por la misma ruta, el GPS colecta información y actualiza la geometría, de manera tal que produce un ciclo de “aprendizaje” que mejorando la estimación de parámetros.

El procedimiento de detección de geometría horizontal utiliza el procedimiento desarrollado por Aburto (2015), usando como base mediciones con GPS RTK de 10 Hz. Asimismo, el algoritmo cuenta con un procedimiento de determinación de repetibilidad y reproducibilidad que permite detectar posible fallas que redunden en la estimación de parámetros geométricos anómalos. El procedimiento está basado en las técnicas de control estadístico de calidad de Montgomery (2013).

### 2.1 Proceso de detección de geometría horizontal

Del registro de datos de terreno con GPS se extraen los datos de ubicación (latitud y longitud) del trazado geométrico, a partir de los cuales se obtienen la distancia recorrida (m) y el azimut (°). Posteriormente se elabora el diagrama de azimut en el cual se identifica, el inicio y fin de la curva horizontal, y se ajusta la función lineal que reconstruya el diagrama de azimut teórico. Es decir, azimut variable linealmente. Luego se calcula el radio geométrico (R) con la Ecuación 1, en que  $d(\text{Heading})/dx$  es la derivada del perfil de azimut respecto de la distancia recorrida en el tramo de pendiente constante.

$$R = \frac{180}{\frac{\pi d(\text{Heading})}{dx}} \quad (1)$$

El algoritmo de detección utiliza cuatro parámetros para la detección de las curvas horizontales y radio geométrico: pendiente entre puntos sucesivos ( $m_{i,i-1}$ ), variación del azimut ( $d_{\text{head}}$ ), “filtro k” y “filtro f”. El “filtro k” permite corregir el efecto del ruido de la señal que enmascara la presencia de clotoides. El “filtro f” permite detectar la presencia de ovoides en el trazado geométrico y evitar el efecto de sobreestimación de radio desde el diagrama de azimut.

La pendiente entre puntos sucesivos ( $m_{i,i-1}$  en °/m) corresponde a la pendiente producida por la variación de azimut y la distancia recorrida entre datos consecutivos del registro de acuerdo con la Ecuación 2.

$$m_{i-1} = \frac{\text{Heading}_i - \text{Heading}_{i-1}}{\text{Distancia recorrida}_i - \text{Distancia recorrida}_{i-1}} \quad (2)$$

La variación del azimut ( $d_{head}$ ): corresponde a la variación entre un par de datos consecutivos, de acuerdo con la Ecuación 3.

$$d_{head} = \text{Heading}_i - \text{Heading}_{i-1} \quad (3)$$

La variación no lineal del azimut en las clotoides genera distorsiones en la detección del inicio y fin de la curva horizontal. Por ello se produce una sobre o subestimación del desarrollo de la curva horizontal y una sobre o subestimación de la variación total del azimut, derivando en una estimación errónea del radio geométrico. Para controlar ello se implementó el “filtro k”, que actúa en la vecindad del inicio y fin de curva, y verifica que la razón entre los valores de pendiente de 2 segmentos sucesivos ( $i$  e  $i-1$ ) desde los extremos supere el valor  $k$ , como lo muestra la Ecuación 4. Si se cumple la condición, asume el valor más externo ( $i-1$ ) como parte de la clotoide y lo elimina. El parámetro  $k$  adopta valores entre 1 y 9.

$$\begin{aligned} \text{Si } \frac{m_i}{m_{i-1}} &\leq k, \text{ ambos segmentos forman parte de la curva horizontal} \\ \text{Si } \frac{m_i}{m_{i-1}} &> k, m_{i-1} \text{ es parte de la clotoide y se elimina de la curva} \end{aligned} \quad (4)$$

El ovoide es una configuración de diseño geométrico en que dos curvas horizontales aisladas son sucesivas, sin tangente intermedia y con el mismo sentido de giro. En este caso, el parámetro variación de azimut ( $d_{head}$ ) considera que ambas curvas son el mismo elemento geométrico y, por lo tanto, estima incorrectamente el desarrollo de la curva y la variación total del azimut. Para ello, el “filtro f” actúa en el desarrollo de la curva horizontal y verifica si el promedio de las pendientes de un subconjunto de segmentos de la curva ovoide ( $i-a, i$ ) supera al del otro segmento ( $i, i+b$ ) en un factor  $f$ , como lo muestra la Ecuación 5. Si se cumple la condición, separa ambos subconjuntos en curvas horizontales diferentes. El parámetro  $f$  adopta valores entre 1 y 9.

$$\begin{aligned} \text{Si } \frac{\sum_{i-a}^i m_i}{\sum_{i}^{i+b} m_i} &\leq f, \text{ ambos segmentos forman parte de la curva horizontal} \\ \text{Si } \frac{\sum_{i-a}^i m_i}{\sum_{i}^{i+b} m_i} &> f, \text{ subconjunto } [i, i+b] \text{ forma parte de otra curva horizontal} \end{aligned} \quad (5)$$

Los filtros  $k$  y  $f$  se optimizan para minimizar el error absoluto, tanto en la detección de curvas como en el cálculo del radio de curvatura. Posteriormente los resultados obtenidos con los filtros optimizados son los que se analizan con el algoritmo de repetibilidad y reproducibilidad.

## 2.2 Proceso de detección de geometría vertical

El procedimiento de detección de geometría horizontal utiliza el procedimiento desarrollado por Cartes et al (2022), usando como base mediciones con GPS RTK de 10 Hz. El procedimiento permite detectar curvas verticales cóncavas, convexas y tramos de pendiente uniforme. En términos de seguridad sin embargo, es de interés detectar pendientes uniformes descendentes que

preceden curvas horizontales, puesto que cambios de marcha hacia marchas que incrementan la velocidad, incrementan la velocidad de entrada y por tanto riesgo de vuelco.

El algoritmo de Cartes et al. (2022) utiliza diagrama de pendientes construido a partir de las cotas obtenidas con GPS. El algoritmo utiliza primero un suavizador para reducir el ruido de los datos, para posteriormente estimar directamente la ubicación de las curvas verticales contiguas, una vez detectada la posición de dichas curvas verticales, se obtiene directamente la pendiente y la longitud en pendiente.

### 2.3 Control de calidad de geometría horizontal

La calidad de una medición se determina en función de la exactitud y de la precisión. En el caso del modelo de detección en línea de curvas horizontales, la exactitud y precisión a la detección de curvas horizontales y a la estimación del radio de curvatura horizontal.

La capacidad de detección de curvas horizontales se define en términos de la cantidad de fallas en la detección. Para ellos se utiliza el modelo de cálculo de tasa de defectos (DPO), que determina la cantidad de defectos (d) respecto de las unidades inspeccionadas (U) y de la cantidad de errores probables (O). La Ecuación 6 describe dicho valor.

$$DPO = \frac{d}{UO} \quad (6)$$

El modelo permite estimar la tasa de defectos, la cual se puede comparar con la cantidad real de detección de curvas, con el propósito de mejorar los algoritmos hasta alcanzar un valor límite predeterminado. En el caso del radio de curvatura, lo que se busca es aproximar con el algoritmo el radio geométrico, asumiendo que siempre existirá una diferencia entre el radio de la trayectoria y el radio geométrico de una curva. Esta diferencia se puede entender como la tolerancia del proceso de estimación de radio de curvatura. De este modo, el indicador a utilizar es la capacidad del proceso de medición ( $C_p$ ) de la Ecuación 7. En dicha ecuación,  $ES - EI$  es la tolerancia del proceso de medición y  $\sigma$  es la desviación estándar de la medición.

$$C_p = \frac{ES - EI}{6\sigma} \quad (7)$$

En las carreteras chilenas, el ancho de pista es estándar en caminos pavimentados y corresponde a 3.5 m. En este sentido el ancho disponible para que un vehículo pesado recorra la curvatura geométrica es de aproximadamente 4 m. Con ello, la ecuación 7 se traduce en una expresión práctica de capacidad del proceso como la Ecuación 8.

$$C_p = \frac{2}{3\sigma} \quad (8)$$

Para evaluar la capacidad del proceso se utilizar la métrica estándar de seis-sigma de la Tabla 1.

Tabla 1: criterios de evaluación de capacidad de un proceso (Escalante, 2004)

Cp	Categoría del proceso	Decisión
$C_p \geq 2$	Clase mundial	Se tiene calidad Seis Sigma
$C_p > 1.33$	1	Adecuado
$1 < C_p < 1.33$	2	Requiere control estricto
$0.67 < C_p < 1$	3	Requiere modificaciones para mejorar el proceso
$C_p < 0.67$	4	Requiere modificaciones mayores

La repetibilidad se define como la variación observada del proceso de medición cuando un operador mide de manera repetida una determinada pieza (radio) con el mismo instrumento (algoritmo de cálculo de radio). La reproducibilidad por su parte corresponde a la variación observada del proceso de medición cuando varios operadores miden de manera repetida una determinada pieza (radio) con el mismo instrumento (algoritmo de cálculo de radio) bajo condiciones cambiantes. De este modo, la variabilidad del proceso corresponde a la variabilidad de la repetibilidad y de la reproducibilidad según la Ecuación 9 (Montgomery, 2013).

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{Repetibilidad}^2 + \sigma_{Reproducibilidad}^2 \quad (9)$$

Para el cálculo de la varianza de la repetibilidad se utiliza una aproximación del algoritmo GRR correspondiente al análisis de varianza (ANOVA). Para estimar la repetibilidad, se aplica el análisis de varianza de medidas repetidas. Para estimar la reproducibilidad se aplica análisis de varianza de dos factores. Una versión práctica es la proporcionada por Montgomery (2013) mediante las Ecuaciones 10 a 12.

$$VE = \bar{R}k_1 ; \quad \sigma_{Repetibilidad} = \frac{VE}{5.15} \quad (10)$$

$$VO = \sqrt{\left(\bar{X}_{dif}k_2\right)^2 - \frac{VE^2}{(n)(t)}} ; \quad \sigma_{Reproducibilidad} = \frac{VO}{5.15} \quad (11)$$

$$EM = \sqrt{VE^2 + VO^2} ; \quad \sigma_{R\&R} = \frac{EM}{5.15} \quad (12)$$

La variable  $\bar{R}$  representa el promedio del rango estadístico de cada grupo de mediciones.  $k_1$  es  $5.15/d_2$ .  $\bar{X}_{dif}$  corresponde a la diferencia entre la media máxima y la mínima.  $k_2$  es  $5.15/d_2$ . Los valores de  $d_2$  se obtienen con la Ecuación 13 para tamaños muestrales ( $n$ ) inferiores a 25. La variable  $n$  es el número de partes (curvas horizontales) y la variable  $t$  es el número de mediciones en cada curva. El criterio de aceptación del proceso se muestra en la Tabla 2.

$$d_2 = 1.0678 \ln(n) + 0.5632 \quad (13)$$

Tabla 2: Criterios de aceptación de repetibilidad y reproducibilidad del proceso (Gutiérrez y de la Vara, 2009)

Repetibilidad y Reproducibilidad	Criterio
< 10 %	Proceso excelente. No requiere ajustes
10 % a 20 %	Proceso bueno. Se requiere seguimiento
20 % a 30 %	Proceso regular. Requiere adaptaciones

### 3 MODELO PARA DETECCIÓN EN LÍNEA DEL RIESGO DE VUELCO

El modelo de detección de probabilidad de vuelco se implementó para vehículos pesados. Para ello se desarrollaron dos algoritmos. Uno elaborado por Valeria (2019) en base al modelo de Cruz y Echaveguren (2019), y otro algoritmo basado en el modelo de Choi (2008). En ambos casos se buscó adaptar modelos con bajos requerimientos de cálculo de modo de simplificar el desarrollo futuro del dispositivo de control de vuelco.

El modelo de Valeria (2019) estima la probabilidad de vuelco en base al radio de las curvas y a la velocidad de ingreso a las curvas horizontales. El modelo de Choi (2008) utiliza balance energético para estimar el diferencial de velocidad que activa el riesgo de vuelco resumido en el índice de vuelco (ROI).

Ambos modelos actúan de manera secuencial. El modelo de Valeria (2019) detecta si la probabilidad de vuelco alcanza un valor límite. Para la velocidad asociada a ese valor límite estima el valor del ROI. Si  $ROI > 0$  calcula el valor de velocidad requerida para  $ROI = 0$  y la informa al conductor en cabina.

#### 3.1 El modelo de probabilidad de vuelco

El modelo de Valeria (2019) estima la probabilidad de vuelco usando como variables independientes el inverso del radio ( $R$ , en m), la velocidad de operación a la entrada de la curva ( $V$ , en km/h) para rangos de peralte entre 3 y 7 %. El modelo fue desarrollado mediante análisis de confiabilidad siguiendo a Cruz y Echaveguren (2019). Para ello utilizó una función de estado límite que consideró como variables aleatorias la aceleración límite para que exista vuelco y la aceleración lateral en curvas. El modelo se desarrolló para camiones articulados, usando datos provenientes de un camión instrumentado con la tecnología SATCAP®. La Ecuación 14 muestra el modelo desarrollado.

$$Pr = e^{\left[ -e^{28.8-1.5V+0.3V^2 \cdot \frac{62.8V-612.8}{R}} \right]} \quad (14)$$

#### 3.2 El índice ROI

El indicador de potencialidad de vuelco (ROI) de Choi (2008) (Ecuación 15) estima la diferencia entre la energía lateral cinética y la energía potencial mínima para que ocurra vuelco. Cuando ROI es positivo, indica que el vehículo tiene potencialidad de experimentar vuelco. Un incremento del ROI significa un incremento de la potencialidad del vuelco.

$$ROI = \frac{1}{2} |V\beta|^2 - \sqrt{g^2 + a_{cy}^2} \sqrt{\left(\frac{t}{2}\right)^2 + h^2} + \frac{t}{2} a_{cy} + hg \quad (15)$$

En la Ecuación 15, ROI es el índice de potencialidad de vuelco del vehículo ( $m^2/s^2$ ); V es velocidad longitudinal del vehículo estimada de los datos del GPS (m/s);  $\beta$  es el ángulo de deslizamiento del vehículo (rad); g es la aceleración de gravedad ( $m/s^2$ );  $a_{cy}$  es la aceleración lateral del vehículo estimada de los datos de GPS ( $m/s^2$ ); t es la trocha del vehículo (m) y h es la altura nominal del centro de gravedad del vehículo (m). Estas últimas dos variables se definen para cada tipo de vehículo.

De las variables que describen el ROI, la más compleja de estimar es el ángulo de deslizamiento el cual depende de la geometría del vehículo, de la posición del centro de gravedad y del centro instantáneo de rotación, el cual posee además correlación con el radio de la curva horizontal y con el ancho de pista del camino.

Gillespie (1992) desarrolló el modelo analítico de estimación de  $\beta(^{\circ})$  (Ver Ecuación 16) basado en el equilibrio de fuerzas del vehículo cuando se desplaza por una curva horizontal aislada. El modelo depende de la distancia entre el eje trasero y el centro de gravedad del vehículo (c, en m), del radio geométrico de la curva horizontal (R, en m), de la carga del eje trasero ( $W_t$ , en kgf), de la velocidad longitudinal del vehículo (V, en m/s) y de la rigidez de giro del eje trasero ( $C_{at}$ , en N/m). La distancia entre el eje trasero y el centro de gravedad del vehículo se obtiene con un balance de momento respecto al eje frontal, considerando las cargas en cada eje.

$$\beta = 57,3 \frac{c}{R} - \frac{W_t V^2}{C_{at} g R} \quad (16)$$

El radio con el modelo descrito en la Sección 2. La velocidad longitudinal se obtiene de las mediciones con un dispositivo GPS instalado en el vehículo. La carga del eje frontal y del eje trasero se estima mediante pesaje considerando escenarios de carga. La rigidez de giro depende de variables tales como, el tipo y tamaño de neumático, ancho de la rueda, masa del vehículo, distancia entre ejes, velocidad, ángulo de deslizamiento de la rueda. Su estimación precisa requiere de vehículos sensorizados. En este trabajo, se utilizó por simplicidad los datos del estado del arte de la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de rigidez de giro y masa de diferentes vehículos

Tipo de Camión	Masa del vehículo (kg)	Rigidez de giro (N/°)	Autor
Ligero	10.249	8.011	Ma et al. (2017)
Articulado	18.000	15.673	Cheng y Cebon (2010)
Con Trailer	21.000	29.058	El-Gindy et al. (2015)

### 3.3 Efecto de las pendientes longitudinales descendentes

En los dos modelos anteriores está presente como variable independiente la velocidad de circulación. En pendientes longitudinales descendentes, existe el riesgo que los vehículos pesados pierdan el control ya sea por desvanecimiento del sistema de frenos como por cambios bruscos de



marchas altas a marchas bajas. Este efecto es particularmente relevante en camiones que no cuentan con sistemas de frenos auxiliares tales como frenos Jacobs o retardadores de frenado (Echaveguren y Vargas, 2013). Por ello, resulta relevante determinar la velocidad límite sobre la cual existe riesgo de pérdida de control.

Esta velocidad límite se utiliza para verificar a priori la probabilidad de vuelco en la primera curva horizontal que el conductor enfrenta en la pendiente longitudinal. La velocidad límite se denomina velocidad máxima de descenso seguro (VMDS, en km/h). Se estima usando la Ecuación 17, la cual se base en los modelos de Bowman (1989) y de Echaveguren y Vargas (2013). En la ecuación el término CN es el coeficiente de pendiente, el cual es el producto de la longitud de la pendiente en km y la inclinación de la pendiente, en %. El modelo de la Ecuación 17 es válido para camiones de hasta 45 toneladas de peso total.

$$VMDS = 120 \left[ 1.04 - 0.9e^{-\frac{47489.2}{CN^2}} \right] \quad (17)$$

El valor de VMDS se sustituye en las Ecuaciones 14 y 15, siendo así posible calcular para cualquier valor de radio la probabilidad de vuelco y el índice ROI.

#### 4 CONCLUSIONES

El vuelco en curvas horizontales es tipo de siniestro poco frecuente pero de alta severidad. Consiste en la desestabilización del vehículo al ingresar a una curva horizontal, debido a la conjunción de característica geométricas del vehículo, su peso y velocidad de ingreso. Es por tanto un fenómeno originado en la geometría de un camino y en las condiciones de operación de cada vehículo. Por ello, contar con un sistema de advertencia en línea permite generar alarmas anticipativas y sugerir al conductor reducir la velocidad antes de ingresar a la curva.

En este trabajo se desarrollaron los aspectos conceptuales básicos para configurar un sistema en línea de advertencia de riesgo de vuelco. Para ello utiliza un modelo para detectar geometría y otro para calcular la probabilidad de vuelco. También cuenta con un modelo de alerta de riesgo de pérdida de control en pendientes descendentes y de vuelco en pendientes descendentes.

El modelo de detección de geometría permite identificar posición y estimar el radio de curvatura en línea. Puesto que utiliza datos de registro de GPS, posee filtros que permiten corregir errores de detección de posición de curvas por la presencia de clotoides y errores de sobreestimación de radios por la presencia de ovoides. El modelo también considera mecanismos para el control continuo de la repetibilidad y reproducibilidad de la detección de localización y radio, lo cual permite detectar descalibraciones o errores de funcionamiento.

El modelo de detección de probabilidad de vuelco utiliza como variables de decisión el radio de curvatura y la velocidad. Por ello, en pasadas sucesivas, resulta posible anticipar antes de ingresar a una curva si la probabilidad de vuelco excede un valor límite y advertir en consecuencia al conductor que debe reducir la velocidad. Puesto que el modelo de probabilidad de vuelco es genérico, el sistema de alerta utiliza el índice ROI el cual incluye además del radio y la velocidad

las características geométricas de un vehículo, lo cual permite considerar cambios en la altura del centro de gravedad y debido a variaciones de carga.

Los modelos de vuelco resultan razonables para el caso de cargas sólidas. Sin embargo, poseen imprecisiones cuando se aplican al caso de cargas líquidas. Para mejorar la precisión en este último caso, se debe recalibrar el modelo de probabilidad de vuelco introduciendo en la función de estado límite el efecto del movimiento de cargas líquidas y en el modelo de aceleración lateral límite del índice ROI. En este último caso, este efecto implica que el centro de gravedad cambia constantemente. Este efecto no se encuentra capturado en la formulación actual del índice ROI.

Un desafío importante es la implementación de estos modelos en dispositivos de control de riesgo de vuelco y la calibración de los modelos. Para ello los autores de este trabajo se encuentran desarrollando un software de simulación para testear los modelos en su integridad. Para ello, también se está desarrollando un generador de trazados geométricos artificiales para inducir condiciones extremas. Con estos desarrollos, resulta posible avanzar a la implementación total de estos modelos.

## 5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, por el financiamiento al proyecto STARTUP Ciencia SUC210044 “Sistema avanzado de control de riesgo vial”, proyecto a partir del cual se elaboró el artículo.

## 6 REFERENCIAS

Aburto, D. (2015). **Método para obtener el alineamiento horizontal de vías rurales usando datos de azimut y distancia**. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.

Alberding, M.B., Tjonnas, J. y Johansen T.A. (2014). Integration of vehicle yaw stabilization and rollover prevention through nonlinear hierarchical control allocation. **Vehicle System Dynamics**, 52(12), 1607 – 1621.

Bowman B. (1989). **Grade Severity Rating System (GSRS)**. Report FHWA-IP-88-015. Federal Highway Administration. Estados Unidos.

Cartes, P., Echaveguren, T. y Álvarez, P. (2022). Effect of driving style on operating speed in crest vertical curves of two-lane highways. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport**, 175(5), 290 – 299.

Cheng, C. y Cebon, D. (2011). Parameter and state estimation for articulated heavy vehicles. **Vehicle System Dynamics**, 49(1-2), 399 – 418.

Choi, S. (2008). Practical vehicle rollover avoidance control using energy method. **Vehicle System Dynamics**, 46(4), 323 – 337.

Cruz, P. y Echaveguren, T. (2019). Reliability-based estimation of heavy vehicle rollover probability on two-lane highways. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 23(11), 4898 – 4909.

Echaveguren, T. y Vargas, S. (2013). Evaluación de la necesidad de lechos de frenado en pendientes descendentes usando principios de confiabilidad. **Revista Ingeniería de Construcción**, 28(3), 221 – 235.

El-Gindy, M., Mrad, N. y Tong, X. (2015). Sensitivity of rearward amplification control of a truck/full trailer to tyre cornering stiffness variations. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, 215(5), 579 – 588.

Escalante, E. (2004). **Seis-sigma. Metodologías y técnicas**. 1ª Edición. Limusa. México.

García, L., Wilson, F. y Innes, D. (2003). Heavy truck dynamic rollover effect of load distribution, cargo type, and road design characteristic. **Transportation Research Record**, 1851, 25 – 31

Gillespie, T. (1992). **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. 1a Edición. SAE International. Estados Unidos.

Gutiérrez, H. y de la Vara, R. (2009). **Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma**. 2ª Edición. McGraw Hill. México.

Hac, A. (2002) Rollover stability index including effects of suspension design. **SAE Technical Paper**, 2002-01-0965.

Huang H-H., Yedevalli, R.K. y Guenther D.A. (2012) Active roll control for rollover prevention of heavy articulated vehicles with multiple-rollover-index minimization. **Vehicle System Dynamics**, 50(3), 471 – 493.

Kühn, W. (2013) **Fundamentals of Road Design**. 1a Edición. WIT Press. Southampton.

Montgomery, D. (2013). **Introduction to Statistical Quality Control**. 7ma Edición. Wiley. Nueva York.

Robertson L. y Kelley A. (1989). Static stability as a predictor of overturn in fatal motor vehicle crashes. **Journal of Trauma-Injury Infection and Critical Care**, 29(3), 313 – 319.

Valeria, D. (2019). **Método para elaborar curvas empíricas de probabilidad de rollover de vehículos articulados**. Memoria de Título. Universidad de Concepción. Chile.