



# Criterios de seguridad en curva para vehículos ferroviarios

<b>Apellidos, nombre</b>	Salvador Zuriaga, Pablo (pabsalzu@cam.upv.es) Villalba Sanchis, Ignacio (igvilsan@cam.upv.es)
<b>Departamento</b>	Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
<b>Centro</b>	Universitat Politècnica de València

## 1 Resumen de las ideas clave

En este documento se muestran los criterios de seguridad empleados para evitar el descarrilamiento de un vehículo ferroviario, los cuales permiten determinar las condiciones de explotación para asegurar que esfuerzos en las ruedas no hagan descarrilar al vehículo.

## 2 Introducción

La tendencia en el diseño de vehículos ferroviarios trata de reducir el peso de los vehículos a la vez que se aumenta su velocidad de circulación. Si bien estos aspectos ayudan a mejorar la eficiencia de los vehículos, es importante tener en cuenta que la reducción de peso puede afectar a la estabilidad y a la seguridad frente al descarrilamiento.

Puesto que el descarrilamiento se produce por el remonte de la rueda sobre el carril o por su descarga, las teorías proporcionan una estimación del riesgo a descarrilo en función de las fuerzas actuantes entre la rueda y el propio carril, durante la marcha del vehículo.

## 3 Objetivos

El objetivo principal de este artículo es determinar la seguridad frente a descarrilo de un vehículo ferroviario. Con ello, el alumno será capaz de:

- Calcular la seguridad de la circulación en curva, mediante diferentes formulaciones.

## 4 Desarrollo

Cuando un vehículo pasa de una alineación recta a una curva con insuficiencia de peralte, éste sigue una dirección rectilínea hasta que el borde de la pestaña de la rueda exterior delantera roza contra el carril exterior de la vía, obligándole a modificar la dirección.

Bajo unas determinadas condiciones, la fuerza que se genera en el rozamiento de la pestaña puede alcanzar un valor suficiente para provocar el descarrilamiento del vehículo. En esta situación, la pestaña es capaz de remontar la cabeza del carril y provocar que el vehículo se salga de la vía.



Grafico 1. Detalle rueda-pestaña-carril.



¿De qué parámetros depende el hecho de que un tren pueda descarrilar?

Para calcular la condición límite en la que una rueda es probable que remonte el carril se utilizan expresiones analíticas simplificadas, tal que permiten determinar la fuerza horizontal máxima o la máxima descarga que puede sufrir una rueda.

## 4.1 Criterio de descarrilo de Nadal

El riesgo de descarrilo de un vehículo ferroviario puede establecerse mediante el denominado criterio de Nadal, el cual se basa en el establecimiento del equilibrio de fuerzas en una rueda en el momento en el que se inicia el remonte de pestaña por la cara lateral del carril.

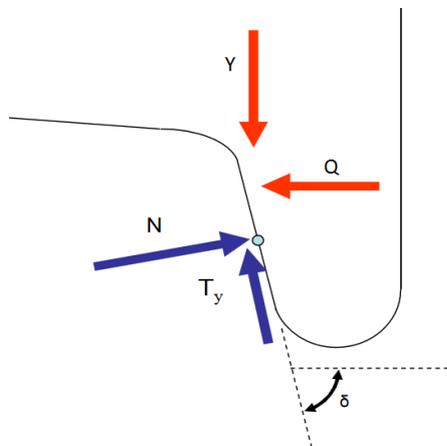
La fórmula adquiere la siguiente expresión:

$$\left(\frac{Y}{Q}\right) = \left(\frac{\tan \delta - \mu}{1 + \mu \tan \delta}\right) \leq \xi$$

*Ecuación 1. Criterio de Nadal para el descarrilo.*

donde:

- $Y$  = Carga lateral.
- $Q$  = Carga vertical, teniendo en cuenta efectos dinámicos.
- $\delta$  = ángulo de contacto entre la pestaña de la rueda y el carril ( $60^\circ < \delta < 70^\circ$ )
- $\mu$  = coeficiente de rozamiento entre rueda-carril ( $0,15 < \mu < 0,4$ ).
- $\xi$  = valor límite



*Grafico 2. Equilibrio de fuerzas en el contacto rueda-carril.*

El valor de  $\xi$  depende pues de la geometría de la rueda y del carril, así como del coeficiente de rozamiento. Para mantener la seguridad de la circulación, algunas administraciones ferroviarias establecen valores máximos de la relación  $Y/Q$ , siendo habitual el valor descrito de  $\xi = 0,8$ . Por su parte, los ferrocarriles japoneses introducen el factor tiempo en la formulación, definiendo valores límite de  $\xi = 0,8$  para tiempos superiores a  $0,05$  s, y de  $\xi = 0,04/t$  para tiempos inferiores a  $0,05$  s.

$$\left(\frac{Y}{Q}\right) < 0,8 \quad \text{para } t \geq 0,05$$

$$\left(\frac{Y}{Q}\right) < \frac{0,04}{t} \quad \text{para } t < 0,05$$

*Ecuación 2. Criterio de seguridad japonés para el descarrilo.*



Bajo estas premisas, y asumiendo la misma fuerza lateral, ¿qué trenes tienen mayor facilidad de descarrilar, los que van cargados o los que circulan en vacío?

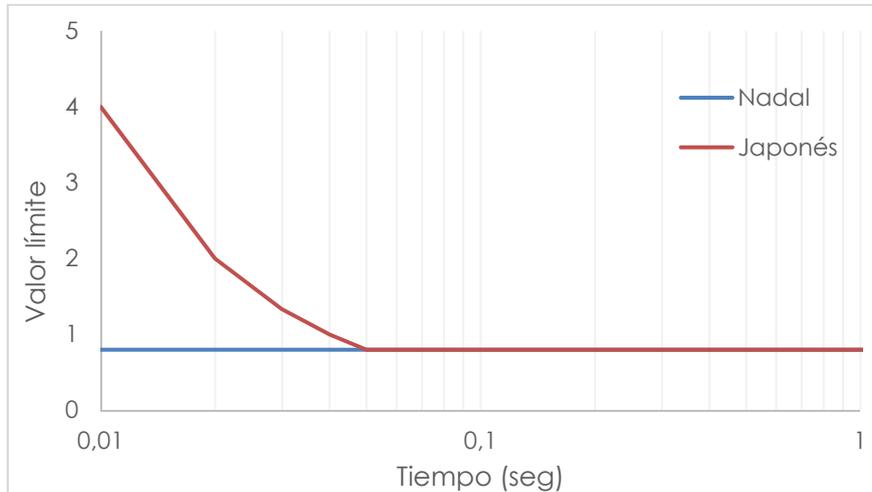


Gráfico 3. Criterios de descarrilo de Nadal y japonés.



¡ATENCIÓN!!!!

Tal y como se observa en el gráfico, los criterios de Nadal y japonés coinciden para tiempos superiores a 0,05 seg.

Pese a que el criterio de Nadal está muy extendido y se ha probado que constituye una eficaz medida para evaluar la seguridad, se trata de un método que no permite conocer la proximidad real al descarrilo cuando no se supera dicho valor límite.

## 4.2 Criterio de descarrilo de Weinstock

Este criterio predice el peligro de descarrilamiento, sumando para ello los valores absolutos de la relación  $Y/Q$  en las dos ruedas de un mismo eje. La seguridad frente a descarrilo se evalúa, por tanto, partiendo del criterio de Nadal, sumando la contribución de la rueda contraria a través del coeficiente de fricción  $\mu$ .

La fórmula, por tanto, adquiere la siguiente forma:

$$\left(\sum \frac{Y}{Q}\right) \leq \left(\frac{Y}{Q}\right)_{lim} + \mu = \left(\frac{\tan \delta - \mu}{1 + \mu \tan \delta}\right) + \mu = \frac{\tan \delta (1 + \mu^2)}{1 + \mu \tan \delta}$$

Ecuación 2. Criterio de Weinstock para el descarrilo.

Tal y como se observa, cuando el coeficiente de fricción en la rueda interior  $\mu$  se aproxima a cero, el criterio de Weinstock adquiere la expresión propuesta por Nadal, debido a que en ese caso no hay contribución de la rueda interior.

Así pues, el criterio de Weinstock es algo más preciso que el criterio de Nadal, a la vez que menos sensible a posibles variaciones en el coeficiente de fricción.

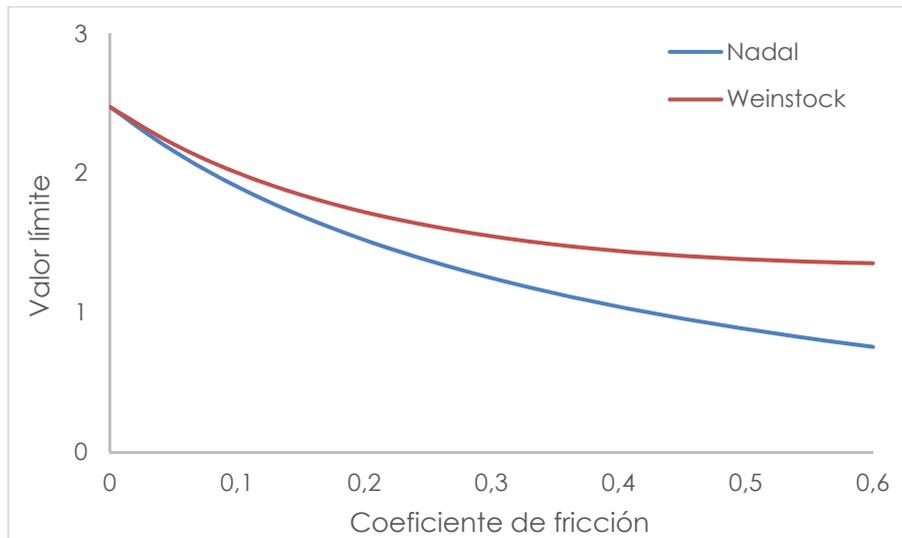


Gráfico 4. Comparativa de criterio de Nadal y Weinstock.

### 4.3 Criterio de descarga de la rueda

Partiendo de nuevo del criterio de Nadal, es posible determinar el criterio de descarrilamiento basado en la descarga máxima admisible de las ruedas. La situación más desfavorable se produce en una curva con exceso de peralte y con alabeo de la vía, pues dicha situación puede descargar la rueda de ataque del vehículo.

El criterio de descarga de la rueda adopta la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{|Q_{min} - Q|}{Q} = \frac{1 - \mu^2 \tan \delta - 2\mu + 2}{1 + \mu * \tan \delta} \leq 0,6$$

Ecuación 3. Criterio de descarga de la rueda.

donde:

$\Delta Q$  = la carga vertical más reducida del bogie/eje analizado

$Q$  = Carga vertical promedio del bogie/eje analizado.



¡ATENCIÓN!!!!

Analizando la ecuación 3, la descarga de la rueda se produce cuando el valor de  $\Delta Q$  es negativo ( $Q_{min} < Q$ ).

Importante!

Como detalle, dado que en España el ancho Ibérico es mayor que el estándar (distancia entre caras internas de los carriles es de 1.668 mm frente a los 1.435 mm) el diferencial de cargas necesario para equilibrar el tren es menor, lo que se traduce en una mayor fuerza lateral para poder volcar un vehículo.



## 5 Cierre

A lo largo de este artículo docente se han descrito los criterios de seguridad en curva que son aplicables a los vehículos ferroviarios para asegurar que no se produce el descarrilo, utilizando las diferentes formulaciones existentes.

## 6 Bibliografía

Nadal, MJ. Theorie de la stabilité des locomotives, part II: mouvement de lacet. Ann Mines 1896; 10: 232–255.

Weinstock H. Wheel climb derailment criteria for evaluation of rail vehicle safety. In: The winter annual meeting of the American Society of Mechanical Engineers, 84-WA/RT-1, New Orleans, LA, 1984.