

Efectos perjudiciales del viento lateral en la circulación de trenes de alta velocidad, propuesta y análisis de diferentes barreras como medidas de mitigación.

Juan de Dios Sanz Bobi

Profesor, Universidad Politécnica de Madrid, España

Berta Suarez Esteban

Jefe de Área de dinámica Ferroviaria, CITEF-UPM, España

Juan Andrés Brunel Vázquez

Ingeniero de proyectos, CITEF-UPM, España

RESUMEN

Este trabajo de investigación es la primera parte de un completo estudio de la influencia del viento lateral sobre los trenes de alta velocidad. En este artículo se recogen los resultados del análisis con dinámica de fluidos computacional que han permitido estudiar los efectos del viento lateral en diferentes ámbitos, evaluando la eficiencia de barreras de formas simples.

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio se encuadra dentro del área de dinámica y medidas de seguridad ferroviaria, en concreto en el estudio de medidas de mitigación de los efectos perjudiciales del viento lateral. Este trabajo surge con el objetivo de estudiar los efectos perjudiciales del viento lateral en diferentes escenarios y evaluar en que medida las barreras para-viento actuales son eficaces de cara a mitigar estos efectos.

El trabajo ha sido desarrollado en el Centro de Investigación en Tecnologías Ferroviarias (CITEF), centro ligado a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.

1.1 Antecedentes

Con el aumento de la velocidad de circulación en los ferrocarriles y su aligeramiento en cuanto al peso por eje, es cada vez más importante el efecto de las cargas aerodinámicas producidas por los vientos laterales sobre los trenes. Estos causan inestabilidades en el equilibrio lateral del vehículo que perturban la circulación del tren, pudiendo causar daños en las instalaciones, o incluso accidentes por vuelco o descarrilamiento.

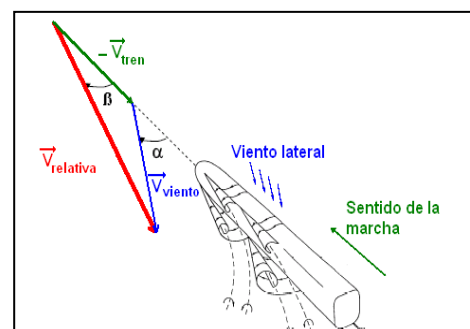


Figura 1: Diagrama de velocidades absolutas y relativas

La velocidad relativa del viento con respecto del tren (vector rojo, Figura 1) depende directamente de la velocidad del tren y de la velocidad del viento. El desarrollo tecnológico del tren y sus infraestructuras en los últimos años no ha hecho más que acrecentar el problema, ya que las velocidades de marcha han aumentado de manera considerable, y las infraestructuras cada día cuentan con más tramos en viaducto y sobre altos terraplenes que acrecientan los efectos perjudiciales del viento lateral (Baker, C.J. y Sterling, M., 2003; Barcala, M.A., 2005).

La disposición de barreras en los laterales de las vías es una de las contramedidas más eficaces y estudiadas (Yun, S.H, 2006; Bettle, J. 2003), si bien su diseño es muy complejo, ya que pueden perturbar la corriente de viento provocando efectos perjudiciales. Además es una medida cara, y es por ello que su empleo aún no es muy común salvo en grandes viaductos.

1.2 Objetivos del presente estudio.

El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio previo del fenómeno en el que se evalúen las características del viento lateral en el entorno de diversos tipos de plataforma ferroviaria, de trenes y de escenarios, con el fin de cuantificar en qué medida estas diferencias afectan a los esfuerzos que actúan sobre cada tren y acotar el principal parámetro de las barreras para-viento, la altura, obteniendo una estimación de los valores más eficaces.

La seguridad de los trenes frente al viento lateral es un problema multidisciplinar, que involucra a la dinámica del vehículo y a su diseño aerodinámico. En la mayoría de los casos requiere de una evaluación de riesgo que tenga en cuenta estos efectos combinados en un tren que funciona sobre una línea específica, y no se puede abordar el problema de manera general. Por ello se va a centrar el estudio en la línea de Alta Velocidad Madrid- Barcelona y en los trenes de Alta Velocidad que efectúan servicios en ella.

Estos resultados están sirviendo, y servirán para el planteamiento y desarrollo de otros trabajos (Sanz J.D, 2009) donde se empleen los datos obtenidos para el desarrollo de infraestructuras o material rodante más eficaces a la hora de reducir los efectos del viento lateral.

2. ACERCAMIENTO AL MODELO.

2.1 Descripción del entorno.

Como se ha indicado, se ha centrado el estudio en la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona. Algunos tramos de esta línea tienen limitada su velocidad un número importante de días al año porque discurren por zonas donde los fuertes vientos son muy comunes (Barrado, J. y Lozano, F.J., 2000; Martínez, J.C., 2008). Se han estudiado los dos trenes de Alta Velocidad de segunda generación que prestan servicios en esta línea, uno es el tren TALGO 350 (Serie 102 RENFE) y el otro el SIEMENS Velaro E (Serie 103 RENFE).

Ambos son trenes que alcanzan velocidades superiores a los 300 km/h en explotación comercial y de morfología muy diferente, uno de formas cuadradas y otro de formas más

redondeadas y más alto. Esto enriquece el estudio y amplía las posibilidades de comparación. En la Figura 2 se puede observar que la forma del perfil de los dos trenes es muy diferente.

Se han simulado las distintas alternativas posibles dentro de las infraestructuras de esta línea de alta velocidad, vías sobre viaducto y vías sobre terreno firme (Arriba y abajo respectivamente en la Figura 2). También se han tenido en cuenta los dos emplazamientos posibles en vías de dos sentidos (vía de barlovento, de donde sopla el viento, y vía de sotavento, el contrario).

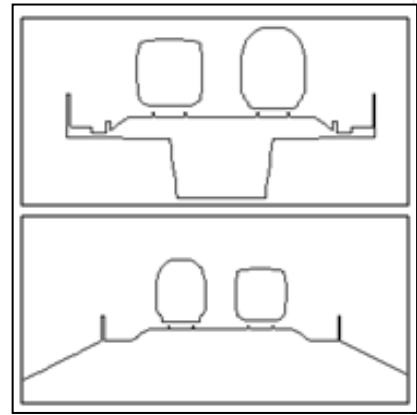


Figura 2: Esquema de los dos escenarios simulados.

2.2 Planteamiento general de los ensayos.

Para el desarrollo de los objetivos del proyecto se ha planteado un estudio en base a simulaciones con un programa de CFD (Computer Fluid Dynamics). Se ha realizado un planteamiento del problema como un análisis bidimensional, que se fundamenta en el hecho de que lo que se pretende es una comparación de diferentes medidas de mitigación de los efectos del viento lateral, y no un acercamiento a la dinámica del tren frente a estos vientos.

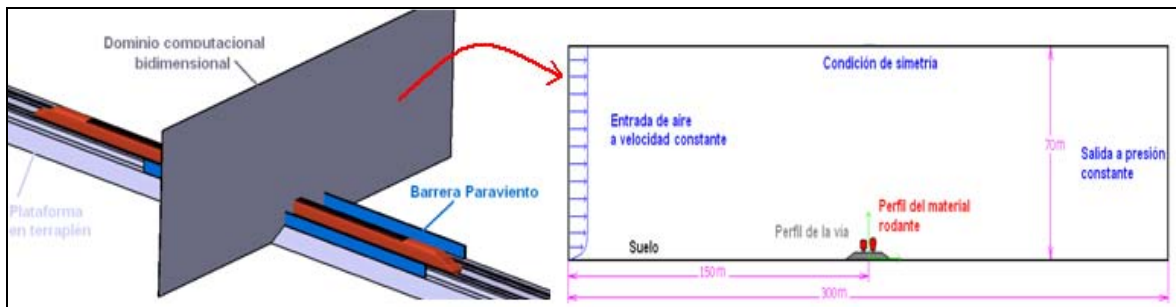


Figura 3: Vista esquemática del dominio computacional seleccionado para el estudio.

El dominio en el que se establecerán los análisis es un cuadrilátero de 300 m de ancho y 70 m de alto que representa el corte transversal de la vía y sus alrededores. La figura 3 muestra el dominio computacional así como las principales condiciones de contorno que lo definen. Se fijan unas condiciones de contorno tipo para este tipo de simulaciones en base a las normas que rigen (Directiva 2004/50/CE). Se define una entrada de aire de velocidad constante, una salida a presión atmosférica y el resto de condiciones de pared con sus respectivas rugosidades acorde con la normativa citada.

Con el fin de obtener unos resultados más precisos, el mallado empleado no es regular; en las zonas donde el interés es mayor (zona cercana al tren y la infraestructura) se ha realizado un mallado más fino. Las celdas del mallado son triangulares, a excepción de la zona alrededor de la superficie del tren donde se optó por un mallado rectangular que es más preciso y regular.

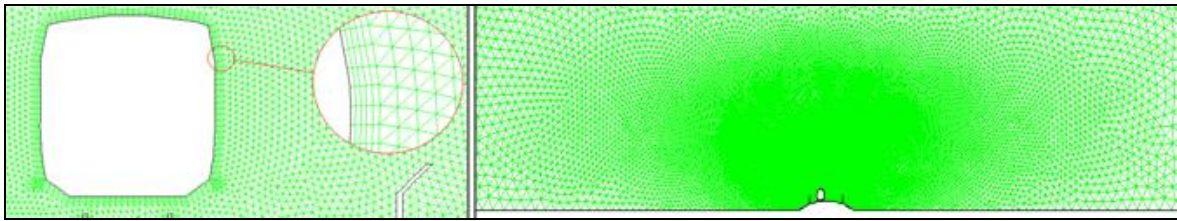


Figura 4: Vista general del mallado para el caso de terraplén (análogo para las vías en viaducto). Detalle del mallado alrededor del tren.

Además el programa permite una mejora del mallado en función de las zonas donde los gradientes (de presión, de velocidad, etc.) son mayores, herramienta que fue empleada para realizar un mallado que dio resultados más exactos en las zonas más comprometidas (principalmente en las esquinas del perfil que representa el tren).

2.3 Acercamiento teórico.

Para evaluar los efectos del viento lateral sobre los trenes se planteo un cálculo de las fuerzas que a causa del viento afectan al tren. Estas fuerzas aerodinámicas se representan según la siguiente ecuación 1:

$$F_{aerod} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_a \cdot A \cdot U^2 \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad del aire, A es el área frontal sobre la que incide el viento y U su velocidad en m/s. C_a es el coeficiente de resistencia aerodinámica del objeto sobre el que se calcula la fuerza. En base a esta fórmula el programa de CFD calcula las fuerzas sobre el tren. En este estudio se han tenido en cuenta tanto fuerzas laterales (S), como de sustentación (L) y de momento respecto del centro del bogie (M_{ov}) de la rueda más alejada de donde sopla el viento (M_{rv}). (Iwnicki, S., 2006).

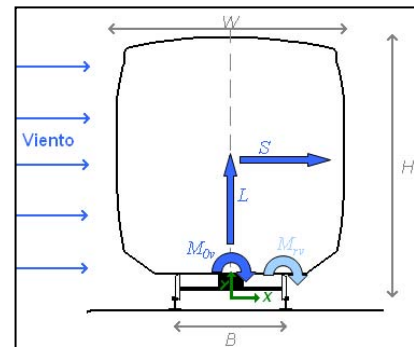


Figura 5: Esquema de fuerzas sobre el tren.

Para comparar entre las diferentes situaciones estudiadas (dos tipos de trenes diferentes y dos tipos de infraestructura, viaducto y terraplén) se ha optado por emplear los coeficientes adimensionales, que permiten comparar diferentes situaciones entre si. Estos coeficientes vienen definidos por las ecuaciones 2.

$$C_s = C_x = \frac{s}{1/2 \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot H} \quad C_l = C_y = \frac{l}{1/2 \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot W} \quad C_{mov} = \frac{m_{ov}}{1/2 \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot H \cdot W} \quad (2)$$

El más importante de cara a este estudio es el de afectación lateral (C_x), ya que se busca un estudio de los esfuerzos laterales sobre el tren frente a vientos cruzados. Además también se estudió el coeficiente C_y asociado a la sustentación, y los mapas de presiones y de vectores de velocidad que permiten observar los puntos donde se crean mayores presiones y observar las estelas.

3. SIMULACIONES Y ANÁLISIS

Los ensayos caracterizan la respuesta de los dos trenes en diferentes situaciones, ambas vías y sobre ambas infraestructuras. Solo se han considerado como protecciones barreras simples verticales de diferentes alturas en el rango de 0 a 3 m.

Los resultados muestran valores de afectación muy dispares en función del tren e infraestructuras consideradas. En la Figura 6 se representa la evolución del coeficiente de afectación lateral C_x en cada uno de los ocho casos para diferentes alturas de barrera.

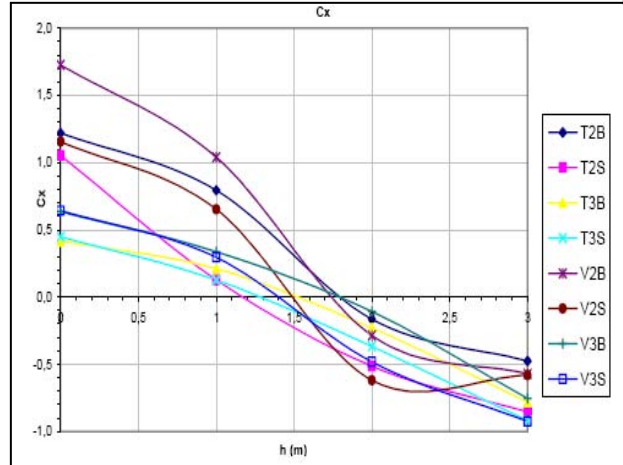


Figura 6: Representación de C_x (eje X) en función de la altura de barrera simple (eje Y) para los ocho modelos estudiados.

Como se aprecia en la gráfica, la afectación lateral en los casos sin barrera ($h=0$ m) es muy dispar, sin embargo, a medida que aumenta la altura de la barrera la afectación converge, pudiendo afirmar que la altura óptima de barrera simple para todos los casos se encuentra entre 1,25 y 1,75 m, que es cuando la afectación lateral se hace cero. Se ha dividido el estudio en tres comparaciones donde se contrasta la influencia del tipo de tren, el tipo de infraestructura, y la situación del tren en vía de barlovento o de sotavento

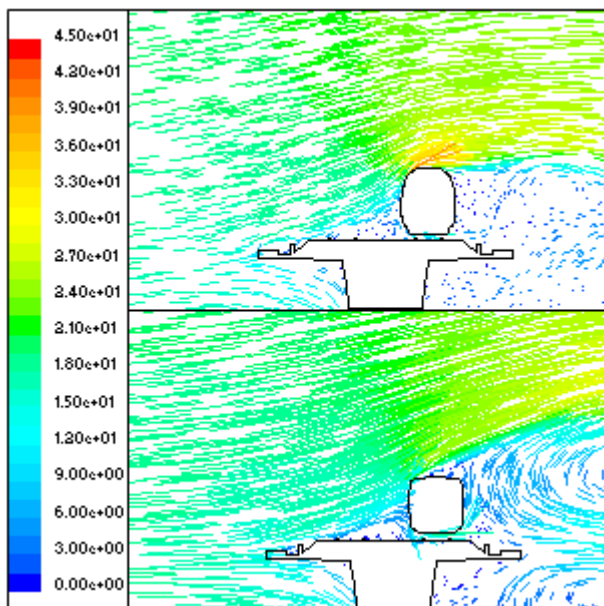


Figura 7: Mapas de vectores velocidad

En ausencia de barrera de protección, la forma del tren es muy relevante de cara a la afectación lateral, siendo mucho más efectivas las formas redondeadas en la parte alta del tren, por tanto, la instalación de barreras será más eficaz de cara a proteger al tren de formas cuadradas. Para ilustrar esta afirmación, las siguientes figuras muestran que con altura de barrera cero, el tren cuadrado, por su forma poco aerodinámica guía peor las líneas de flujo, lo que provoca un estancamiento de estas que hace que aumente la presión, y en consecuencia, que el C_x sea mucho mayor.

El diseño de trenes como el Serie 103, de formas más redondeadas, resulta más eficaz

para luchar contra los efectos del viento lateral, ya que su perfil más aerodinámico mejora sus prestaciones, haciéndolo menos vulnerable, siempre y cuando su peso permita hacer despreciables los efectos de la sustentación, que es mucho mayor que para el tren de formas cuadradas.

Además, también se observa que sin barrera de protección, los trenes que circulan sobre un viaducto sufren más los efectos del viento lateral, y por tanto se harán más necesarias las medidas correctoras, algo que ya confirman los resultados de otros trabajos recogidos en el apartado de antecedentes. Sin embargo al aumentar el detalle del análisis, se observa, que a pesar de que las vías en viaducto están más afectadas por el viento lateral, para ambos trenes el rango de altura óptima (1,5 m a 1,75 m) coincide tanto en vías sobre viaducto como en vías sobre terraplén.

Los trenes situados en la vía de sotavento se ven más beneficiados con la instalación de barreras protectoras, ya que su C_x y C_y disminuye más que para los trenes a barlovento y alcanzan óptimos con alturas de barreras inferiores.

Al respecto de este último punto se puede sacar otra importante conclusión, las condiciones de altura de barrera que son óptimas para un determinado tren situado en barlovento, no lo son para el mismo tren situado a sotavento ni para un tren diferente. Esto se debe a que barreras óptimas para un tren en vía de barlovento crean depresiones, que provocan que el tren en vía de sotavento se vea forzado a contraviento. Por tanto si se diseña una barrera de altura suficiente como para proteger al tren de la vía de barlovento, se conseguirá un efecto contrario al deseado sobre el tren situado en la vía de sotavento, que se verá considerablemente forzado a contraviento.

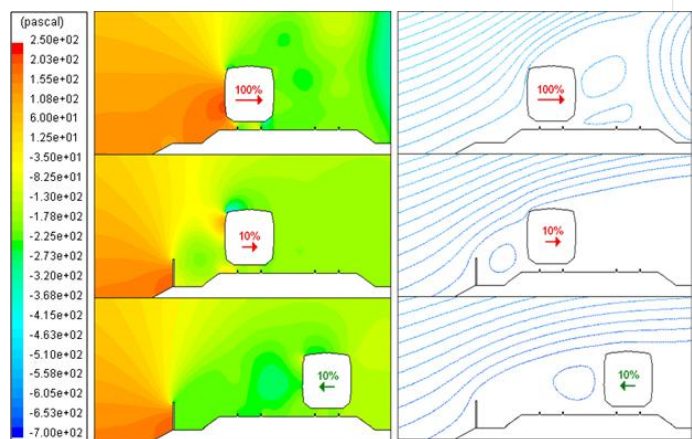


Figura 8: Representación a modo de ejemplo del efecto de depresión que fuerza al tren de la vía de sotavento (derecha) a contraviento. Valores aproximados de fuerza en tanto por ciento respecto a una fuerza total sin barrera.

En el ejemplo de la Figura 8, realizado con valores aproximados, en la primera imagen el tren se enfrenta al viento lateral sin barrera, y se considera la fuerza lateral que sufre como el 100% que puede afectarle en ese modelo. Al colocar una barrera de cierta altura esta afectación disminuye notablemente, haciendo que el tren se encuentre más protegido frente al viento. Ahora bien, si se mantiene la barrera y se lleva al tren a la vía de sotavento, la afectación ha cambiado de sentido, y aunque es de bajo valor absoluto, existe.

Sucede entonces que la vía de barlovento responde muy bien ante la colocación de barreras protectoras simples, pero en la vía de sotavento los resultados no son tan buenos como cabría esperar. Por otro lado, en todos los casos los valores de C_y que representan la sustentación, mejoran con la instalación de barreras, sobre todo para los trenes situados a sotavento.

Por este motivo, en futuros desarrollos, se deben buscar modelos de barreras que por sus características morfológicas logren mitigar el efecto de vacío que fuerza al tren en sentido contrario al viento, sobre todo cuando este se sitúa en la vía de sotavento. Las barreras tienen que conseguir un equilibrio entre la protección de ambos trenes situados en las dos vías.

3. CONCLUSIONES.

En este trabajo de investigación se ha realizado un completo estudio sobre la afectación del fenómeno del viento lateral, en base a simulaciones con CFD, realizándose un eficaz estudio en el que se han evaluado las características del viento lateral en el entorno de los diferentes tipos de plataforma ferroviaria, de trenes y de escenarios, consiguiéndose cuantificar, en qué medida estas diferencias afectan a los esfuerzos que actúan sobre cada tren.

Se han recabado una gran cantidad de datos, se han acotado muchos de los valores influyentes, y se han estudiado las soluciones que se están empleando actualmente en forma de barreras verticales simples. En el estudio se ha podido verificar que estas barreras no son lo suficientemente eficaces para proteger todas las circulaciones de la línea de alta velocidad planteada.

El estudio se ha realizado en una situación real, centrándose en las características técnicas y operativas de una Línea de Alta Velocidad que actualmente se ve afectada por vientos fuertes que en ocasiones no permiten la circulación de los trenes a su velocidad máxima. De ahí la importancia del trabajo de investigación, que puede servir como punto de partida de otros estudios que busquen un diseño no convencional y óptimo de barrera para-viento.

REFERENCIAS.

BAKER, C.J. and STERLING, M. (2003). Current and Recent International Work on Railway Aerodynamics. *School of Engineering University of Birmingham. Rail Safety and Standards Board*. Issue number 4, August 11th 2003.

BARCALA MONTEJANO, M.A. (2005). Tesis sobre el uso de parapetos para reducir las cargas del viento lateral en trenes de alta velocidad. *UPM. E. T. S. I. AERONÁUTICOS*.

BARRADO, J. and LOZANO, F.J. (2000). Incidencia de los fenómenos meteorológicos sobre la explotación de líneas ferroviarias de alta velocidad. Aplicación al tramo Guadalajara-Zaragoza de la nueva línea Madrid- Barcelona- frontera francesa. *Programa de Becas de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles*. Memoria final, pp. 10-11.

BETTLE, J., HOLLOWAY, A.G.L. and VENART, J.E.S, (2003). A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle o a bridge on a cross-wind. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91, 573–592.

IWNICKI, S. (2006). *Handbook of railway vehicle dynamics*. CRC Press, ISBN: 9780849333217.

MARTÍNEZ, J.C., IGLESIAS DÍAZ, J. OSMA RUIZ, S., RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, M. AND ÁLVAREZ LEGAZPI, P. (2008). Nuevo sistema de medición y control del viento lateral en la línea de alta velocidad Madrid- Barcelona- Figueras (tramo Madrid- Lérida). *VIII Congreso de Ingeniería de transporte*. A Coruña, España.

SANZ, J.D; SUÁREZ B.; GARZÓN, J. and BRUNEL, J.A. (2009). Protection High Speed Trains against lateral wind effects. IMECE 2009-10353. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Lake Buena Vista, Florida, USA.

YUN, S.H., KU, Y.C., RHO, J.H., KO, T.H., KWON, H.B. and LEE, D.H. (2006). Numerical Study on the Interactions between Rail Vehicle and Wind Fence under Strong Cross Wind -For the Effective Wind Fence Design. *7th World Congress on Railway Research*. Montréal, Canada, June 4 and June 8, 2006.