

MODELIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN VÍA-TRANVÍA

Susana Anacleto Lupiáñez

Resumen: A pesar de su extendida implantación, todos los países que disponen de red de tranvía y/o metro ligero padecen la falta de normativas específicas para la construcción y mantenimiento de su superestructura. Esta realidad ha provocado prácticas como la adopción directa o la extrapolación de valores normativos de tolerancias geométricas aplicables a líneas de ferrocarril convencional, pero no existe una trasposición clara de esas tolerancias para el trazado de ferrocarriles urbanos.

Dadas las evidentes diferencias de las líneas de ferrocarril urbano con respecto a las de ferrocarril convencional (en términos de carga por eje del vehículo, homogeneidad del tráfico, velocidad de circulación, radios de curvatura del trazado en planta, rigidez de la plataforma, etc.), las tolerancias de recepción de vía nueva y de mantenimiento exigidas por las administraciones para las obras de líneas urbanas resultan demasiado estrictas. En consecuencia, se produce una disminución importante de la eficiencia de los trabajos en términos de tiempo de ejecución y coste.

Entre los principales objetivos de la tesina destaca la propuesta de una metodología completa que permita, a partir de los registros de los defectos geométricos de una vía, acabar estimando valores adecuados de tolerancias geométricas. El criterio impuesto a estas tolerancias es la garantía de cierto nivel de confort en la marcha del vehículo. Y es precisamente la aplicación de criterios de confort al cálculo de tolerancias lo que se define como novedoso de este estudio, puesto que es tradicionalmente el criterio de la seguridad (riesgo de descarrilo) el que rige en la normativa en materia de calidad de vía.

Palabras clave: Ingeniería ferroviaria, geometría de la vía, tranvía, interacción vía-vehículo, tolerancias geométricas, límites geométricos, confort de los pasajeros, comodidad de viaje.

Abstract: In spite of tramway infrastructure's spread over the last few years, all the countries having a tramway or a light rail network suffer from lack of specific standards for the construction and the maintenance of their superstructure. This fact has lead to practices as the direct adoption or the extrapolation of geometric limit values from conventional railways, but it does not exists any clear criteria to justify the tolerances that are finally demanded to tramway constructors.

Given the obvious differences between conventional and urban railway lines with regard to axle loads, traffic homogeneity, service speed, minimum radius of curvature, platform stiffness, etc., both the limit values of defects demanded by the authorities for new track reception and the ones for maintenance operations appear to be too strict. Consequently, a reduction in efficiency, in terms of time of works' execution and costs, takes place.

Among the main goals of the thesis, there is the definition of a methodology which allows to estimate appropriate limit values starting from a geometric track defect record. These geometric tolerances must be defined fulfilling the condition of guaranteeing certain level of vehicle ride comfort. The application of comfort criteria to the calculation of track defects' limit values is precisely the original piece of this study, since the criterion of security (risk of derailment) is the one which traditionally governs track quality standards.

Keywords: Railway engineering, track geometry, tramway, track-vehicle interaction, geometric tolerance, geometric limits, passenger comfort, traveling comfort.

1. Introducción. Ausencia de marco normativo específico para ferrocarriles urbanos ligeros.

La presencia de defectos en cualquiera de los parámetros geométricos de una vía atenta contra el confort e incluso la seguridad de la marcha del vehículo ferroviario. Existen diversas normativas para la regulación de los límites admisibles de cada tipo de defecto geométrico de una vía ferroviaria, que, sin embargo, son solamente aplicables a los casos de líneas convencionales y/o a líneas de alta velocidad, puesto que se basan en experiencias y estudios realizados sobre vehículos y superestructuras de ese tipo.

A pesar de su extendida implantación, los ferrocarriles urbanos ligeros (y, más concretamente, los tranvías) **carecen de normativa específica en materia de calidad geométrica de la vía**. Esta realidad ha provocado prácticas como la **adopción directa o la extrapolación de valores normativos de tolerancias geométricas aplicables a líneas de ferrocarril convencional**. Siendo tantas las variables que intervienen en la respuesta dinámica de un vehículo ferroviario (velocidad de circulación, frecuencias propias de vibración de las masas del vehículo, geometría y defectos de la vía), y dadas las evidentes diferencias de las líneas de tranvía con respecto a las de ferrocarril convencional, en términos de carga por eje del vehículo, homogeneidad del tráfico, velocidad de circulación, radios de curvatura del trazado en planta, rigidez de la plataforma, etc., dicha extrapolación de tolerancias no resulta para nada evidente.

Sólo en la normativa europea más reciente en materia de calidad geométrica de la vía (concretamente: UIC 518, UNE-EN 13231-1 y UNE-EN 13848-5), se definen **valores límite para los distintos parámetros geométricos en función de la velocidad de circulación**, que es un factor imprescindible para la evaluación de la calidad de una vía.

Clase de tipo	I	II	III	IV	V
Rango de velocidades (km/h)	$V \leq 80$	$80 < V \leq 120$	$120 < V \leq 160$	$160 < V \leq 220$	$V > 220$
Parámetros					
Ancho de vía (mm) (valor diseñado/medido)	± 3	± 3	± 2	± 2	± 2
Nivelación transversal (mm) (valor diseñado/medido)	± 3	± 3	± 3	± 2	± 2
Nivelación longitudinal (mm) (valor medio a pico)	± 6	± 5	± 4	± 4	± 3
Cuerda simétrica de 10 m					
Nivelación longitudinal (mm) (valor pico a pico)	5	4	4	3	3
Cuerda simétrica de 10 m					
Alineación (mm) (valor medio a pico)	± 5	± 4	± 4	± 3	± 3
Cuerda simétrica de 10 m					
Alineación (mm) (valor pico a pico)	5	4	4	3	3
Cuerda simétrica de 10 m					
Alabeo (mm/m) (Línea de referencia cero a pico calculada en una base de 3 m)	$\pm 1,5$	± 1	± 1	± 1	± 1

Tabla 7. Tolerancias de recepción de vías renovadas y nuevas.

Fuente: UNE-EN 13231-1

En cualquier caso, dichas tolerancias parecen estar basadas en la experiencia de los principales ferrocarriles europeos, es decir, que no se sustentan en ningún cálculo. Además, incluso en estas normativas siguen sin tenerse en cuenta el resto de características específicas de la superestructura de las líneas de ferrocarriles urbanos, que las distinguen de las ferroviarias convencionales y que pueden tener una gran influencia en la calidad de la circulación y en el confort de los pasajeros.

El desconocimiento de una metodología que permita extrapolar adecuadamente las tolerancias de estas normas para la superestructura de los tranvías da lugar a que cada administración acabe exigiendo a las empresas constructoras unas tolerancias distintas para la recepción de sus nuevas (o renovadas) infraestructuras tranviarias. Para ejemplificar esta realidad, se presentan en la tabla siguiente las tolerancias geométricas exigidas en la construcción de los tranvías de Barcelona, Valencia, Tenerife y Dublín.

El hecho de adoptar unas tolerancias inadecuadas (en general, demasiado exigentes) da lugar a superestructuras sobredimensionadas y, en consecuencia, a una disminución importante de la eficiencia de los trabajos en términos de tiempo de ejecución y coste.

PARÁMETRO	ÍNDICE	TOLERANCIA recepción vía nueva			
		BARCELONA	VALENCIA	TENERIFE	DUBLÍN
ALINEACIÓN	Nominal - pico	$\pm 4\text{mm}$	$\pm 30\text{mm}$	$\pm 3\text{mm}$	$\pm 5\text{mm}$
	Variación en recta	$0,5\text{mm/m}$ (cuerda 10m)	$3\text{mm}/5\text{ m}$	$2\text{mm}/3\text{m}$	$3\text{mm}/3\text{m}$
	Variación en curva	--	Pico-pico: $\pm 5\text{mm}$ ($20 < R < 200$)m Pico-pico: $\pm 3\text{mm}$ ($200 < R < 500$)m	--	--
NIVELACIÓN LONG.	Nominal - pico	$\pm 2\text{mm}$	$\pm 20\text{mm}$	$\pm 3\text{mm}$	$\pm 5\text{mm}$
	Variación	$0,5\text{mm/m}$ (cuerda 10m)	$3\text{mm}/5\text{m}$	$2\text{mm}/3\text{m}$	$1,5\text{mm}$ (cuerda de 10m)
PERALTE	Nominal - pico	$\pm 2\text{mm}$	--	$\pm 1\text{mm}$	$\pm 2\text{mm}$
	Variación (alabeo)	$0,4\text{mm/m}$	$3\text{mm}/5\text{m}$	$3\text{mm}/5\text{m}$	1mm/m
ANCHO	Nominal - pico	$0, +2\text{mm}$	$\pm 2\text{mm}$	$\pm 1\text{mm}$	$\pm 2\text{mm}$
	Variación	1mm/m	--	1mm/m	$\pm 2\text{mm}/3\text{m}$

Tabla 7. Tolerancias de recepción exigidas en algunos tranvías de reciente construcción.

Fuente: COMSA S.A.

En vista de las evidentes carencias en el marco normativo por lo que respecta a la calidad de vía de las redes tranviarias, el objetivo último de este trabajo es la propuesta de una metodología de estimación de tolerancias geométricas basada en criterios de confort del pasajero.

2. Interacción vía-tranvía. Análisis dinámico

La principal excitación de los vehículos ferroviarios al recorrer una vía proviene de las irregularidades en la geometría de ésta.

Se supone un caso teórico en el que los defectos de la vía fueran ondas armónicas (sinusoides, por ejemplo). Cuando un sistema oscilante (el vehículo) recorre una **onda armónica espacial** (un defecto regular de la vía) a una velocidad V , se ve sometido a una **excitación armónica temporal** que provocará en las distintas masas del vehículo una determinada respuesta en forma de vibración, también temporal.

La frecuencia de una onda espacial se define como el número de ciclos por unidad de longitud, mientras que la frecuencia de una onda temporal es el número de ciclos por unidad de tiempo. Así, la velocidad a la que se recorre una onda espacial (unidades de espacio/tiempo) sirve como factor de conversión de frecuencia espacial ($f_{espacial}$) a frecuencia temporal ($f_{temporal}$), pudiéndose conocer la frecuencia de la excitación temporal a la que el vehículo se ve sometido si se sabe previamente el valor de la frecuencia de la irregularidad espacial.

$$f_{temporal} = V \cdot f_{espacial} \quad (1)$$

O bien:

$$f_{temporal} = \frac{V}{L_{espacial}} \quad (2)$$

Siendo $L_{espacial}$ la longitud de onda espacial del defecto de la vía.

Una conclusión importante de este análisis es el hecho de que **la frecuencia de la excitación armónica temporal depende no sólo de la longitud de onda armónica espacial sino también de la velocidad de circulación**, creciendo proporcionalmente con ésta.

Cualquier defecto geométrico de una vía puede modelizarse mediante una función espacial $G(s)$, siendo s la posición medida sobre la vía. Pero resulta evidente que el registro de una determinada irregularidad de la vía no responde a una función armónica. Sin embargo, la generalización de lo expuesto para un defecto de tipo sinusoidal a un registro de defectos reales es posible gracias al denominado **Análisis de Fourier**. De acuerdo con la Teoría de

Fourier, toda señal que cumpla unas determinadas características puede ser representada por una serie de sumas trigonométricas en senos y cosenos relacionadas armónicamente. Es decir, que cada una de las señales representando un defecto de la vía puede ser descompuesta en una suma de infinitas funciones periódicas, caracterizadas por sus correspondientes amplitud y frecuencia o, equivalentemente, por su amplitud y su longitud de onda.

Entonces, siguiendo con la notación adoptada, la función $G(s)$, que a priori se considera continua, podría descomponerse según la expresión:

$$G(s) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \cos(2\pi f_n s) + b_n \sin(2\pi f_n s)] = \sum_{n=0}^{\infty} [A_n \sin(2\pi f_n s + \varphi_n)] = \sum_{n=0}^{\infty} C_f(s) \quad (3)$$

Donde $C_f(s)$ son los componentes armónicos en que se descompone la señal original tras aplicar la transformación de Fourier.

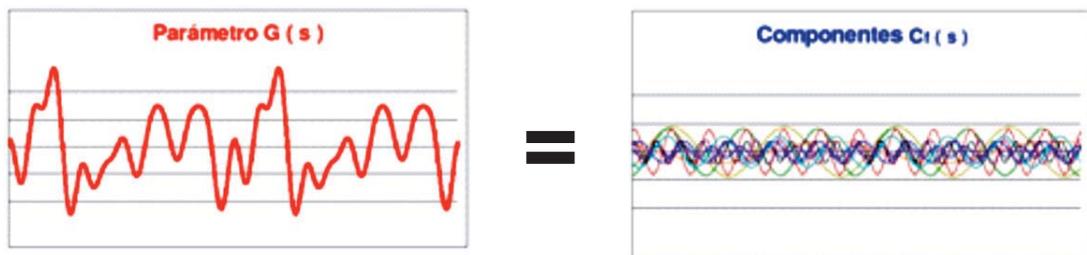


Figura 2. Descomposición de la función $G(s)$ en una suma de ondas armónicas espaciales $C_f(s)$.

Por consiguiente, cuando un vehículo recorre una vía con una velocidad V , cada una de las infinitas ondas armónicas espaciales que constituyen las irregularidades geométricas de la vía se transforma en una excitación armónica temporal. Estas excitaciones producen en los distintos componentes del vehículo una respuesta dinámica. La amplitud de las oscilaciones del vehículo (A_p) depende de:

- La amplitud de las excitaciones (A_e).
- La proximidad entre la frecuencia de las excitaciones (f_e) y alguna de las frecuencias propias de las masas del vehículo.

Esto queda perfectamente explicado con la representación gráfica de la Función de Respuesta Frecuencial.

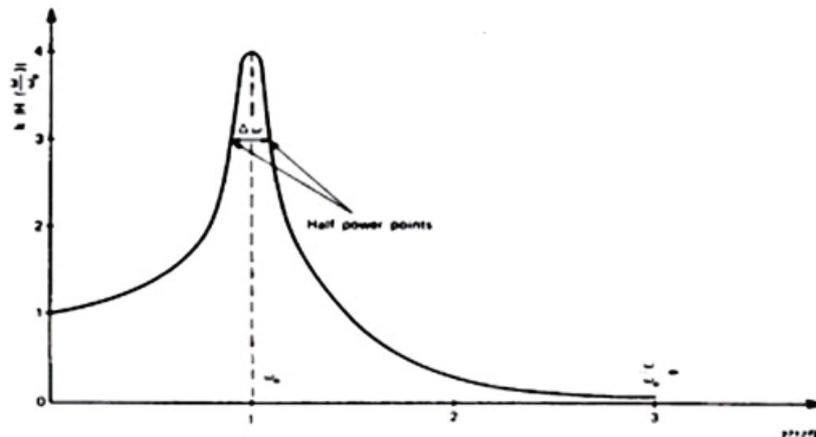


Figura 3. Función de Respuesta Frecuencial para el cuerpo de un vehículo ferroviario.

Este fenómeno, que tiene como consecuencia grandes amplificaciones dinámicas de la vibración de respuesta del sistema, debido al acoplamiento de la frecuencia de la excitación con la frecuencia propia, se conoce como **resonancia** del sistema.

Tras este análisis conceptual, se evidencia que, para que la reparación de una vía sea efectiva, es necesario **corregir principalmente aquellos defectos que provocan resonancias con los diferentes elementos de los vehículos**. Dichos defectos pueden identificarse mediante la ec. 3, imponiendo la condición $f_{temporal} \approx f_p$; los datos necesarios son la velocidad de circulación del vehículo y las frecuencias propias de vibración de las masas que lo constituyen (masas suspendidas, masas semi-suspendidas y masas no suspendidas), y lo que se obtiene es la longitud de onda de los defectos más perjudiciales.

3. Análisis de la calidad geométrica de un tramo de vía

El tramo de vía seleccionado para el análisis corresponde a una sección del tranvía de Barcelona perteneciente a la línea del Trambaix y comprendida entre las estaciones *Les Aigües* y *Cornellà Centre*. Es un tramo de **540 m** de longitud cuyo trazado presenta una sucesión de curvas de radios que van desde aproximadamente los **40 m** hasta los casi **400 m**.

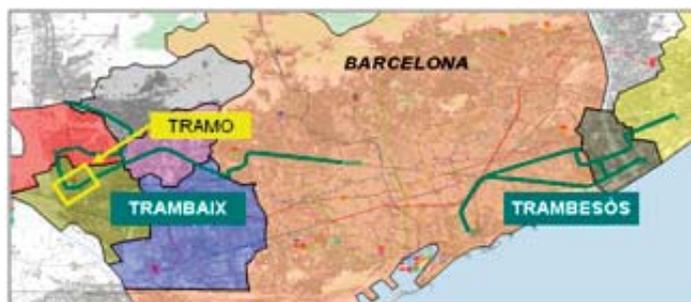


Figura 4. Ubicación del tramo de vía experimental.

El dato de partida de este estudio son los **registros de geometría de vía primaria** de la última campaña de auscultación, realizada en agosto de 2004 por la empresa COMSA EMTE, encargada del mantenimiento de la superestructura tranviaria de Barcelona.

El objetivo de este estudio es evaluar la “magnitud” de los **defectos de la vía** del tramo experimental, y para ello es necesario procesar la señal primaria mediante distintas técnicas. El post-proceso se ha lleva a cabo con un *software* específicamente desarrollado para el auscultador KRAB (que es el que se utilizó en la campaña de 2004); los dos tratamientos a realizar son los siguientes:

- a. Filtración de la señal primaria.
- b. Descomposición de la señal filtrada en distintas longitudes de onda. Análisis espectral.

La longitud de onda de los **defectos de la vía** se encuentra contenida en un determinado rango. En la norma europea UNE-EN 13848-1, se definen 3 rangos de longitud de onda de los defectos de la geometría de la vía:

- **D1**: $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$
- **D2**: $25 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$.
- **D3**: $70 \text{ m} < \lambda \leq 150 \text{ m}$ (para la nivelación longitudinal).
 $70 \text{ m} < \lambda \leq 200 \text{ m}$ (para la alineación).

Además, y como se ha expuesto en el apartado 2.2 de este artículo, determinadas longitudes de onda de estos defectos son más perjudiciales que otras para el vehículo, en función de si pueden provocar resonancia en alguna de sus masas.

La filtración de señales es un proceso mediante el cual **se eliminan (o se atenúan) determinados componentes no deseados de una señal**. En el caso de estudio se ha empleado el filtro *Butterworth* de 4º orden para quedarse solamente con los componentes de los registros originales comprendidos en las siguientes bandas de longitud de onda:

- $3 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$, para los registros de defectos de nivelación, alineación y peralte.
- $0.5 \text{ m} < \lambda \leq 25 \text{ m}$, para defectos de ancho.

A continuación, se ha utilizado la teoría de las **Series de Fourier** para descomponer el registro filtrado en sus distintos armónicos (sinusoides), con el objeto de separar y caracterizar (mediante su amplitud y su longitud de onda – o frecuencia-) cada uno de los defectos presentes en la vía estudiada.

Concretamente, lo que se ha empleado es la **Transformada Discreta de Fourier (TDF)**, puesto que el registro de defectos no es más que una serie discreta de N observaciones tomadas con una distancia de muestreo Δx ($\Delta x = 0.25$ m, en el caso del auscultador KRAB). La teoría de Fourier para el caso discreto permite obtener, exclusivamente, una **serie finita de amplitudes** asociadas a unas longitudes de onda contenidas en el intervalo $[2\Delta x, L]$.

Lo que se presenta como resultado de la descomposición del registro filtrado no es un gráfico como el de la figura 3, en el que se superponen los distintos armónicos, sino el llamado **espectro del registro**, también denominado **periodograma** en otra bibliografía (concretamente en el libro de Melis Maynar, “*Apuntes de Introducción a la dinámica vertical de la vía y a las señales digitales en ferrocarriles*”). La definición práctica del espectro de un registro geométrico de una vía, de carácter discreto, no es más que la **representación de las amplitudes de las componentes armónicas del registro en las ordenadas versus las longitudes de onda o las frecuencias asociadas en las abscisas**.

Con los tres gráficos siguientes se muestra la evolución del post-proceso y los resultados obtenidos en cada una de sus etapas. Dichos gráficos corresponden al parámetro de alineación de la vía.

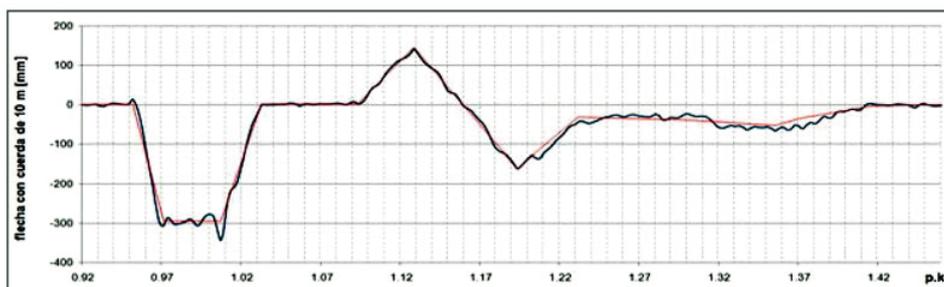


Figura 5. Registro primario de alineación del tramo experimental.

Se muestra a continuación la señal filtrada (también denominada “señal dinámica”) del registro de alineación anterior tras la sustracción de la línea media. Además, vienen indicadas con una línea discontinua roja las tolerancias de la norma UNE-EN 13231-1.

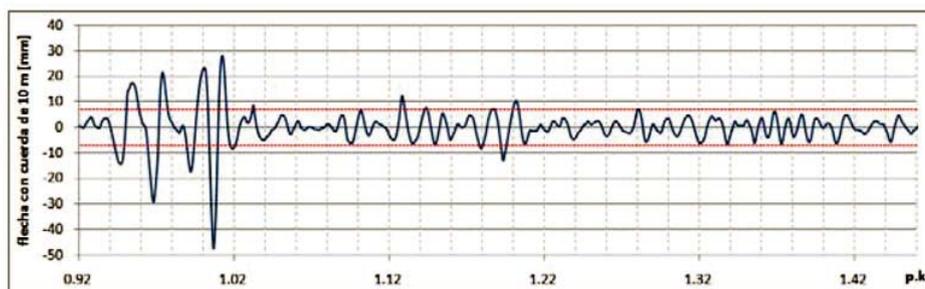


Figura 6. Señal filtrada (o dinámica) del registro de alineación del tramo experimental.

En la segunda etapa de post-proceso se obtiene el espectro de la señal dinámica en la banda de longitudes de onda de 0 m -25 m.

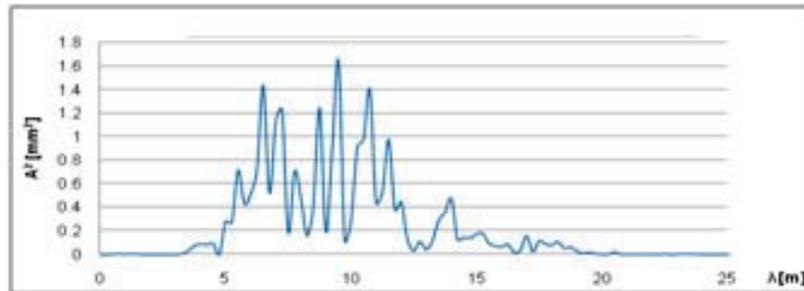


Figura 7. Espectro de la alineación dinámica.

El **análisis de calidad geométrica** propiamente dicho se lleva a cabo tras el post-proceso de los registros originales del tramo de vía experimental. Consiste en la **caracterización estadística** de los registros dinámicos de banda limitada (señal filtrada). Dicha caracterización se lleva a cabo dividiendo el tramo experimental en **16 subsecciones** de longitud variable, coincidiendo con tramos de geometría en planta homogénea (rectas, curvas de transición y curvas circulares), y calculando para cada subtramo los siguientes estimadores muestrales: **máximo** y **mínimo**, **media aritmética**, **media geométrica**, **desviación típica** (muestral), **varianza** (muestral), **asimetría** y **curtosis**. Las tablas de resultados del análisis de calidad geométrica pueden consultarse en el documento completo de la tesina.

4. Metodología de estimación de tolerancias geométricas para el tranvía aplicando criterios de confort

A lo largo de este trabajo de investigación se ha venido alimentando la idea de que la aplicabilidad de la normativa existente de calidad de vía ferroviaria al caso de ferrocarriles urbanos ligeros queda en entredicho.

Tras haber ahondado en el campo de la dinámica ferroviaria y de la modelización de la interacción vía-vehículo, se evidencia que el grado de complejidad de plantear una metodología completa que permita, a partir del conocimiento de la geometría tipo de una vía tranviaria con defectos, establecer unas tolerancias adecuadas a las características de la superestructura, el material rodante y el servicio tranviarios es alto. Más aún teniendo en cuenta que no se ha encontrado bibliografía en la que se proponga nada parecido.

El objetivo final de proponer unas nuevas tolerancias para cada parámetro geométrico de la vía tranviaria resulta, a priori, y con los medios de que se dispone, muy ambicioso. Por ello, la metodología que a continuación se propone y describe no pretende ser más que un primer paso hacia lo que podría ser, en un futuro, y tras mucho más desarrollo, un procedimiento estándar para fijar las tolerancias geométricas particularizadas a cada tipo de infraestructura ferroviaria.

Debe quedar claro al lector, por otra parte, que el procedimiento propuesto a continuación no está validado globalmente y que algunas de las etapas sólo se plantean a nivel conceptual, sin dar resultados cuantitativos particulares del caso de estudio. Así, como adelanto y a modo de ejemplo, cabe destacar que por su complejidad técnica no se lleva a cabo la simulación por ordenador del vehículo tranviario.

Se adjunta a continuación un diagrama que pretende explicar de manera gráfica el procedimiento propuesto.

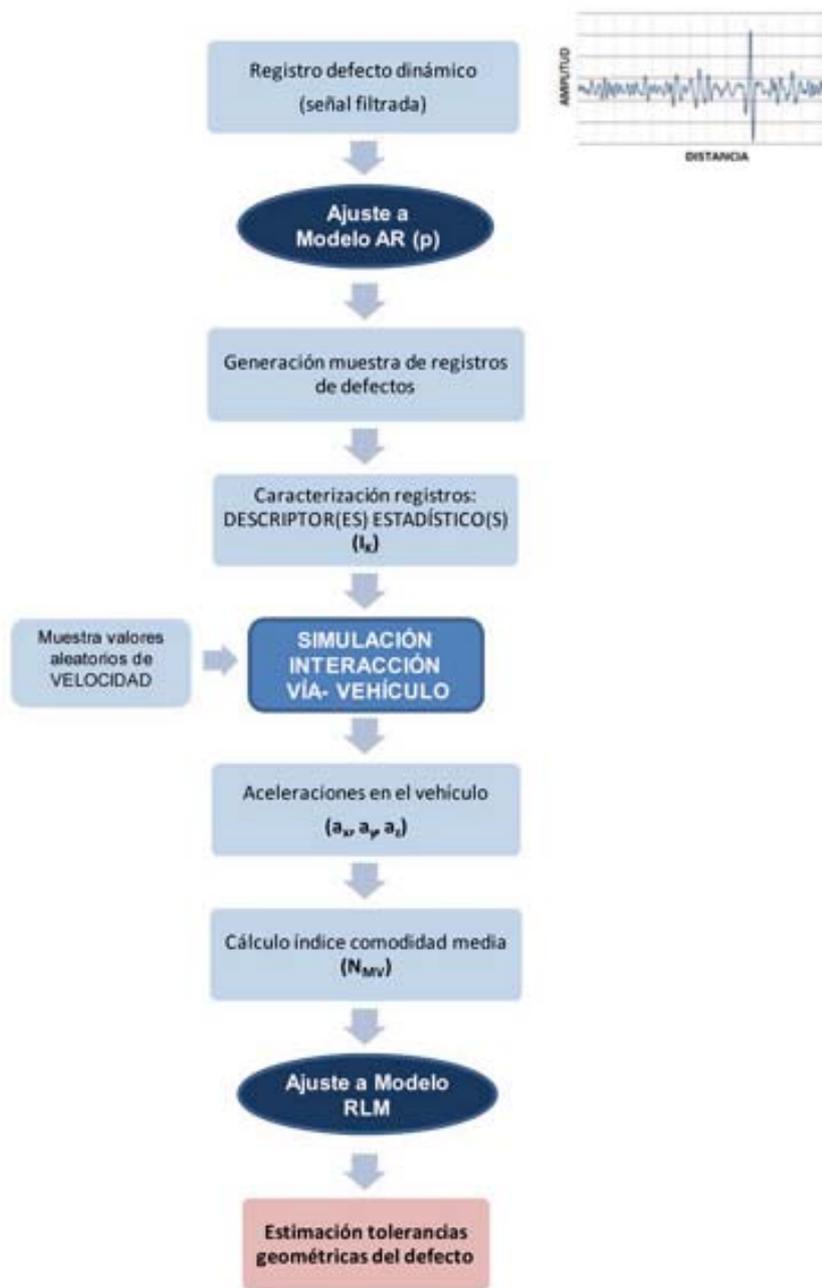


Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

En esta metodología, el criterio que rige la determinación de valores adecuados de tolerancia es el del **confort del pasajero** (o confort de la marcha), que en ingeniería ferroviaria suele estar ligado al nivel de vibraciones mecánicas que padecen los pasajeros del vehículo y a la idea de que la tolerancia humana a las vibraciones depende de la frecuencia de la excitación. Existen en la bibliografía y en la normativa específica distintos índices de confort, cuya característica común es que son **funciones de las aceleraciones medidas dentro del vehículo y de unas determinadas funciones de ponderación en frecuencia de dichas aceleraciones**.

El índice que se propone usar en esta metodología es uno de los definidos en la norma europea experimental UNE-ENV 12299, concretamente, el **índice de comodidad media** N_{MV} .

$$N_{MV} = 6 \cdot \sqrt{(a_{XP95}^{Wd})^2 + (a_{YP95}^{Wd})^2 + (a_{ZP95}^{Wb})^2} \quad (4)$$

Donde:

a_{XP95}^{Wd} : 95° centil del valor eficaz de la aceleración longitudinal (en eje X), medida al nivel del suelo, ponderada en frecuencia con la curva de ponderación W_d (definida en la norma ISO 2631).

a_{YP95}^{Wd} : 95° centil del valor eficaz de la aceleración transversal (en eje Y), medida al nivel del suelo, ponderada en frecuencia con la curva de ponderación W_d (definida en la norma ISO 2631).

a_{ZP95}^{Wb} : 95° centil del valor eficaz de la aceleración v (en eje X), medida al nivel del suelo, ponderada en frecuencia con la curva de ponderación W_b (definida en la norma BS 6841).

Breve descripción de la metodología

La metodología presentada tiene como punto de partida un registro filtrado (dinámico) de un determinado defecto de una vía tranviaria. Bajo la hipótesis de que el registro de partida es suficientemente representativo, en esta primera etapa se propone ajustar la serie de datos a un Modelo Autorregresivo (AR), según el cual ésta se aproxima a una combinación lineal de variables independientes más un término aleatorio (también llamado ruido). De manera formal este tipo de modelo se puede representar como:

$$y(n) = - \sum_{k=1}^p a(k) \cdot y(n-k) + u(n) \quad (5)$$

Siendo $y(n)$ la señal dinámica del defecto en la posición n de la vía; $y(n-k)$ (con k de 1 a p) los valores de la señal en las p posiciones anteriores, donde p es el orden del modelo; $a(k)$ los coeficientes de predicción a determinar y $u(n)$ un ruido blanco gaussiano, normalmente distribuido con media nula y varianza σ^2

Observación: Junto con la teoría de Fourier, los modelos AR también son empleados para obtener el espectro de una señal.

Puesto que el fenómeno de la interacción vía-vehículo (en particular, vía-tranvía) no puede considerarse determinista en ningún caso, **tanto los defectos de la vía como la velocidad de circulación deben tener un carácter aleatorio**. Partiendo de un único registro de un determinado defecto de la vía del tramo experimental no podemos obtener un resultado cuya interpretación sea extrapolable a ningún otro caso. Por ello, la segunda etapa de esta metodología consiste en la **generación de una muestra suficientemente amplia de registros aleatorios a partir de la señal dinámica inicial**. Esta generación se lleva a cabo modificando la varianza σ^2 del ruido blanco del modelo de predicción AR. Para cada nuevo valor de varianza se obtiene un nuevo registro de defectos.

En una tercera etapa, se calcula, para cada uno de los registros de la muestra, el **índice de calidad** que se haya escogido (descriptor estadístico sobre el que establecer las tolerancias; p.e.: valor pico, valor medio a pico, desviación típica, etc.). Se denomina genéricamente I_k al índice de calidad del registro k-ésimo. Tras haber analizado la normativa vigente en materia de calidad geométrica de la vía, **se escoge el valor pico máximo del registro (en valor absoluto) como descriptor:**

$$I_k = \max(|y_k(n)|) \quad (6)$$

Si el valor extremo de la amplitud de los defectos cumple la tolerancia, es evidente que todos los puntos del registro la cumplirán.

Seguidamente, debe realizarse la simulación por ordenador de la interacción dinámica vía-tranvía mediante un programa de simulación ferroviaria multicuerpo (p.e. VAMPIRE). Son muchos los datos necesarios para la simulación. En términos generales, se requiere información detallada de la geometría y las características mecánicas de todos y cada uno de los componentes del vehículo (caja, bogies, muelles y amortiguadores del sistema de suspensión, ruedas, etc.), de la geometría y los defectos de la vía y, finalmente, de la geometría del contacto rueda-carril.

El dato de salida que se requiere de esta etapa de simulación es el valor de las aceleraciones en el interior del vehículo, que son las que padece el pasajero (la posición de medición de las aceleraciones debe ajustarse a lo especificado al respecto en la norma UNE-ENV 12299). A partir de las aceleraciones obtenidas (que deberían validarse mediante la medición real de aceleraciones en el tranvía que se simule), puede calcularse el **índice de comodidad media** N_{MV} (o cualquier otro que se haya escogido). Este tipo de índices se caracterizan por ser variables de tipo categóricas con más de dos categorías. Por ejemplo, en el caso del índice N_{MV} , la escala de comodidad consiste en 5 categorías:

$N < 1$	Muy cómodo
$1 \leq N < 2$	Cómodo
$2 \leq N < 4$	Medio
$4 \leq N < 5$	Incómodo
$N \geq 5$	Muy incómodo

Para el ajuste del índice N_{MV} se elige un **Modelo de Regresión Logística Multinomial (RLM)**, que es el adecuado para este tipo de variables. Lo que se obtiene como resultado es la **curva probabilidad de cada una de las categorías del índice de confort (N_{MV}) como función del descriptor estadístico de calidad de la vía (I_k)**. En el gráfico siguiente se muestra un ejemplo sencillo (caso de una variable dependiente con 3 categorías) de la representación gráfica de las curvas de probabilidad obtenidas con el ajuste RLM.

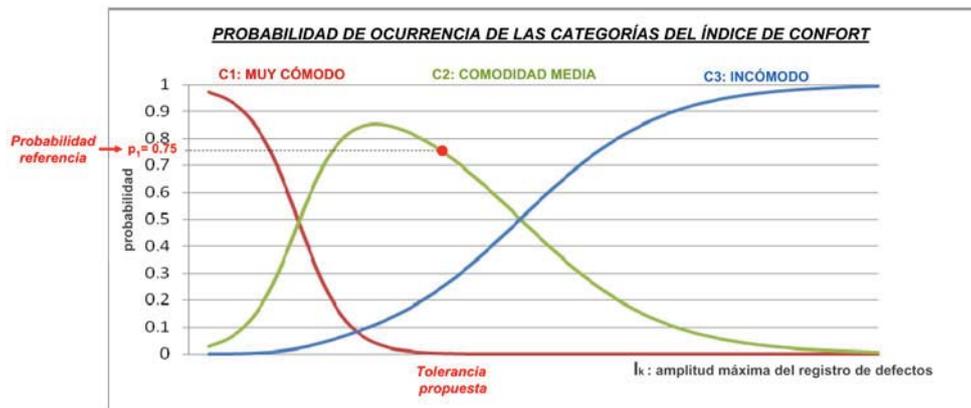


Figura 9. Ejemplo del resultado obtenido para un hipotético modelo de regresión logística multinomial.

Antes de realizar cualquier tipo de análisis a partir de un gráfico como el anterior, es necesario establecer 2 criterios:

La probabilidad de referencia, o probabilidad mínima para que una categoría de confort se considere cierta. Por ejemplo, podría establecerse que una categoría C_i ocurre sólo cuando su probabilidad asociada es mayor o igual a 0,75. En ese supuesto, el valor de la covariable X^* señalado en el gráfico anterior sería el valor límite del defecto para el cual se admitiría que la categoría de confort es la C_1 (p.e. $C_1 = muy cómodo$).

La categoría de referencia, o categoría de confort sobre la que se van a establecer las tolerancias geométricas. Seguramente, exigir una categoría de máxima comodidad sería un criterio demasiado estricto. Parece adecuado establecer la categoría de comodidad media para las tolerancias de mantenimiento y la categoría "cómodo" para las de recepción de vía nueva.

Se enumeran a continuación los 2 resultados principales que pueden extraerse de un gráfico como el anterior, aplicado al caso de estudio, una vez tomadas las dos decisiones especificadas:

Podría demostrarse si las tolerancias exigidas para la recepción de la vía tranviaria analizada son o no demasiado estrictas. Consistiría simplemente en comprobar qué probabilidades tienen cada una de las categorías del índice de confort, fijado dicho valor de tolerancia (valor pico máximo). La tolerancia sería demasiado exigente si la categoría de confort asociada

(categoría con una probabilidad superior a la probabilidad de referencia – p.e. $p_{ref} = 0,75$ -) fuera superior (más confortable) a la de referencia.

Podría estimarse un valor de tolerancia adecuado para cada parámetro geométrico de la vía. La tolerancia elegida sería el valor máximo de del índice de calidad I_k para el cual la categoría de confort de referencia fuera cierta.

5. Líneas de investigación

Este estudio académico podría contribuir a una futura reducción del nivel de exigencia de la reglamentación actual con referencia tanto a la recepción de vía nueva o recién renovada como a la recepción de mantenimiento de líneas ferroviarias urbanas ligeras. Con ello se facilitarían los procesos constructivos y de mantenimiento, aumentando sus rendimientos y reduciendo sus costes.

Para alcanzar ese objetivo, debería estudiarse en mayor profundidad cada una de las etapas de la metodología propuesta. Los principales puntos de investigación serían los siguientes:

- **Registros geométricos de partida.** Necesidad clara de disponer de un mayor número de registros de geometría de vía tranviaria a fin de poder asumir un menor grado de incertidumbre en la representatividad de los datos.
- **Realización de la simulación por ordenador del vehículo y de la interacción vía-tranvía.**
- **Calibración del modelo de simulación.** Dado que la salida del modelo son los registros de aceleraciones en el interior del vehículo (posición especificada por UNE-EN 12299), deberían obtenerse registros reales de las aceleraciones sufridas por el vehículo al circular por el tramo de vía experimental.
- **Estudio de la interacción entre distintos defectos.** Deberían estudiarse en detalle los efectos dinámicos de la interacción de distintos defectos geométricos de la vía y su afectación a las tolerancias geométricas. A pesar de que intuitivamente parece evidente que varios defectos de vía combinados podrían producir mayores vibraciones en el vehículo, dicho fenómeno de interacción es una de las grandes ausencias en la normativa vigente.