

01-036

CONSIDERATIONS AFFECTING THE CIRCULATION VIABILITY PROJECTS OF ARTICULATED VEHICLES IN SPECIAL TRANSPORTS

Fadón Salazar, Fernando; Díez Gutiérrez, Joaquín; Cerón Hoyos, Enrique
Universidad de Cantabria

Currently large indivisible goods are transported on road what needs a viability project required by de road owner (Spain government or autonomous community). It is common the use of application software for the study of critical way points in entry/exit motorways, access to urban areas, turns at roundabouts...The transition of the vehicles, the deviation that the wheels suffer, and the rest of parameters are regulated in the directive UE 96/53/EC. Road transport is limited by the viability of movement according to width, length, height, weight or a combination of them. In this paper is intended to explain the different methods to make these kind of projects, important points to consider, existing documentation and the search of the itinerary that enables the transport. In addition, It is analyzed the geometrical relations in turns in different circumstances, depending on the technical elements that configure the transport.

Keywords: *Instant Centre of Rotation; Tractrix; Rear Swing Out; steering Axle*

CONSIDERACIONES QUE AFECTAN A LOS PROYECTOS DE VIABILIDAD DE PASO DE VEHÍCULOS ARTICULADOS EN TRANSPORTES ESPECIALES

Actualmente se transportan por carretera grandes piezas indivisibles que obligan a la realización de un proyecto de viabilidad de paso requerido por el propietario de la vía (Comunidades Autónomas o Ministerio de Fomento). Es común el uso de aplicaciones informáticas para el estudio de los puntos críticos de paso de los vehículos en entradas y salidas de autovías, acceso a zonas urbanas, giros en glorietas, zonas de paso en las propias fábricas y cadenas de producción. La transición de los vehículos o el desvío que sufren las ruedas en los giros a baja velocidad e incluso la abertura hacia afuera de la trasera están regulados por la Directiva UE 96/53/EC. El transporte por carretera está limitado a la viabilidad de paso por anchura, longitud, altura, peso o a una combinación de ellas. Se pretende explicar los distintos procedimientos para la redacción de este tipo de proyectos, aspectos importantes a considerar como la documentación necesaria, la elección de la ruta más adecuada. Se analiza con más detalle las relaciones con la geometría de giros en diversas circunstancias dependiendo de los elementos técnicos que configuren el transporte.

Palabras clave: *Centro Instantáneo de Rotación; Tractriz; Desviación trasera; Eje directriz*

Correspondencia: Fernando Fadón fadonf@unican.es Joaquín Díez diezj@unican.es

1 Introducción

Cuando se plantea el transporte de elementos de cientos de toneladas y grandes dimensiones, al equipo que se emplea para tal fin se denomina conjunto modular, el número de ejes se caracteriza porque es variable de modo que se van añadiendo módulos compuestos por un eje hasta lograr repartir el peso de la carga en la carretera, de esta forma, las cargas transmitidas a la vía son las de un trailer convencional. Las cabezas tractoras actuales tienen una potencia disponible de más de 600 CV además de las transmisiones y los convertidores de par especialmente preparados para poder arrastrar la plataforma junto con la carga. La única limitación serán las dimensiones del elemento a transportar o el peso de la pieza indivisible que hacen disponer de más ejes y aumentar la longitud del transporte. En zonas de rampas pronunciadas, la realización de maniobras a baja velocidad pueden hacer aconsejable la unión de dos o más cabezas tractoras para poder comenzar a rodar.

El conjunto modular denominado comúnmente como ciempiés permite elevar o bajar el nivel de la plataforma mediante sistemas hidráulicos, algunos disponen de motores para moverse sin necesidad de la tractora reduciendo en gran medida los radios de giro.

Es precisamente este conjunto formado por la plataforma y una o varias cabezas tractoras lo que termina siendo un vehículo tecnológicamente avanzado que actualmente no se usa pero puede llegar a utilizar las nuevas tecnologías para facilitar su maniobrabilidad.

A lo largo de esta exposición, se hará mención de la normativa existente pero sobre todo a los puntos que el proyectista debe tener en cuenta a la hora de redactar un documento de estas características.

Diferentes investigadores han estudiado la problemática de maniobras restringidas para diferentes tipos de vehículos con remolque tales como Gómez-Bravo, Cuesta y Ollero (2001), (2000), Caracciolo, De Luca y Iannitti (1999), Lamiroux, Sekhavat y Launmond (1999) además de otros. Estos autores generalmente enfocan sus estudios hacia la robótica, modelizando el problema mediante matrices de giro. Otros autores Amit, Nadav y Shay (2005), Antos y Ambrósio (2004) han investigado la trayectoria y la cinemática para vehículos independientes, sin remolque.

2 Objetivos

Se propone aportar una pauta en la realización de los proyectos de viabilidad de paso y conocer herramientas que se pueden utilizar, tales como las que permiten analizar el trazado en planta y alzado en curvas y acuerdos verticales (cambios de rasante). Se investiga sobre la circulación de grandes mercancías por carretera que puedan introducir tecnología en los vehículos para facilitar la conducción y como se puede mejorar, debido a que si se dotan de sensores, a la vez que recorre la ruta se obtiene en tiempo real los datos de gálibo de las carreteras, bien para aprovechamiento de la empresa transportista o bien para el propio Ministerio de Fomento con un coste mínimo.

3 Metodología del proyecto de transportes especiales

En este epígrafe se tratarán los parámetros de partida para la realización de un estudio de viabilidad, las consideraciones a tener en cuenta en función de las restricciones específicas de cada caso, la actividad que hay que realizar en campo y los criterios del estudio en cuanto a las maniobras especiales.

3.1. Parámetros de partida

Se parte de la base que cada país tiene una normativa propia en cuanto al trazado de carreteras y vías, en España está legislado por la Instrucción 3.1.IC cuya última actualización es de febrero de 2000, además existen numerosas recomendaciones para enlaces, nudos, glorietas, o incluso para la trayectoria de giro de vehículos a baja velocidad.

Para el diseño de una vía para la circulación de vehículos se han de determinar dos parámetros fundamentales, el primero de ellos es la *velocidad específica* o velocidad de diseño que será la que determine los radios de las curvas, peraltes, sobreeanchos y, las longitudes de los acuerdos verticales en base a la distancia de visibilidad y de seguridad para circular a esa velocidad. El segundo de los parámetros es la IMD, (intensidad media diaria de los vehículos que circulan por la vía), que define el paquete de firmes necesario para que la carretera sea capaz de soportar ese tráfico sin un deterioro de las capas inferiores que produzcan el colapso de la vía.

Con estos dos parámetros queda recogida la geometría de la vía, el problema es que por condiciones orográficas, modificaciones durante la vida o bien obras que se están ejecutando en ese momento, no se puede garantizar esa geometría en todo el recorrido y esto obliga a que cuando es necesario transportar cualquier mercancía que excede de los límites permitidos por el código de circulación sea necesario un estudio pormenorizado del transporte así como una autorización especial concedida por la Dirección General de Tráfico, en el que se demuestre que el transporte puede circular con las actuaciones previas necesarias y no excede del peso por eje permitido y por tanto no deteriorará la infraestructura.

Todas las carreteras están afectadas por la señalización, balizamiento e iluminación de la vía, siendo obstáculos a considerar en el estudio.

3.2. Parámetros conocidos

Son parámetros conocidos el elemento a transportar en tipología y peso y la cabeza tractora que va a realizar el transporte, propiedad de la empresa transportista que tiene contratado el servicio. Según las dimensiones y el reparto de la carga, se diseñará la plataforma necesaria, número de ejes, portatubos e incluso la altura sobre el suelo de la pieza. También se conoce el itinerario que efectuará el transporte.

Una vez solicitado a la Dirección General de Tráfico el itinerario previsto, será remitido a los distintos organismos "*propietarios*" de las carreteras que estén afectadas para su aprobación de paso.

3.3. Características para la solicitud de un estudio de viabilidad

Para redactar un proyecto de estudio de viabilidad de paso para transportes especiales es necesario conocer los condicionantes que puedan imposibilitar el paso. Estos podrán ser por longitud, anchura, altura o peso de la pieza a transportar y deberá especificarse el tipo de condicionante.

En España, según la Nota de Servicio 2/2014 del Ministerio de Fomento, se requiere un estudio de viabilidad para los transportes especiales extraordinarios y para los especiales excepcionales siendo necesaria la elaboración de un Estudio Específico cuando se excede de las siguientes dimensiones, indicadas en la Tabla 1:

Tabla 1: Requerimiento estudio específico

DIMENSIONES	TTE. ESPECIAL GENERICO	TTE. ESPECIAL ORDINARIO	TTE. ESPECIAL EXTRAORDINARIO	TTE. ESPECIAL EXCEPCIONAL
anchura	< 5,50 m.	< 6,50 m.	< 7,00 m.	> 7,00 m.
longitud	< 45,00 m.	< 45,00 m.	< 60,00 m.	> 60,00 m.
altura	< 4,70 m.	< 4,85 m.	< 4,90 m.	> 4,90 m.
masa máxima	< 110 Tm.	< 170 Tm.	< 300 Tm.	> 300 Tm.
estudio específico	NO REQUIERE	NO REQUIERE	SI REQUIERE	SI REQUIERE

El propio Ministerio también puede solicitarlo por motivos de seguridad, vías nuevas, obras o empresa transportista nueva. Para las carreteras no Estatales, será la propia Dirección General de Tráfico (DGT) quien envíe la solicitud del permiso de paso al propietario de las mismas (Comunidad Autónoma, Ayuntamiento...).

Con esta Tabla 1, se puede hacer una idea de las dimensiones y peso de las mercancías que se pueden desplazar por las carreteras estatales que evidentemente son las de mayores dimensiones (Autopistas y Autovías), cualquier otra carretera autonómica, regional o local generalmente tendrá menores anchuras de calzada debido a que la velocidad específica para la que fue diseñada y su IMD son menores e implicará que los radios de curvatura y los acuerdos verticales son inferiores, además de otros condicionantes añadidos como viviendas, pasos estrechos, tendidos aéreos...

3.4. Consideraciones a tener en cuenta en el estudio específico en función de las restricciones

Aparentemente puede parecer que la masa no es un problema debido a que se solventa con la implantación de más ejes sobre el semirremolque, pero indirectamente sí lo es debido a que todas las estructuras se calculan para que soporten un tren de cargas determinado por normativa.

Como la carga a transportar se acerca a la máxima admitida por la estructura y la disposición de la misma es distinta de la calculada sobre el proyecto, se puede someter a la estructura a esfuerzos plásticos que produzcan un deterioro de la misma o llegar al colapso.

En la Tabla 2, se especifican los distintos tipos de estudios específicos para que el proyectista pueda hacer los análisis pertinentes una vez conocidos los parámetros de salida. Generalmente las restricciones son a añadir, siendo la más básica por anchura de la pieza a transportar y la más compleja por masa máxima autorizada para circular.

Tabla 2: Estudio específico en función de las restricciones

DIMENSIONES	ESTUDIO ESPECIFICO
Anchura	Estudio en planta de los giros y maniobras especiales en los puntos críticos
Longitud	Los anteriores además de estudio en alzado de los acuerdos verticales cóncavos o convexos.

Altura	Las estructuras superiores que crucen sobre la vía, banderolas, cables y en el caso de túneles o estructuras anchas, los giros y maniobras para comprobar el gálibo. Además de las limitaciones de los anteriores.
Masa Máxima	Re-cálculo de las estructuras que se encuentre a su paso para comprobar los esfuerzos para no superar en un 10% el máximo de los proyectados (tren de cargas). Además de las limitaciones de los anteriores.

Pudiera ser que el paso por esa ruta sea inviable, habrá que buscar otra zona de paso con el inconveniente que al salir de una autovía o autopista aparecerán nuevos condicionantes que generalmente serán de anchura o altura.

En carreteras distintas de Autopistas o Autovías, una solución muy utilizada es el uso de puentes desmontables tipo Bailey o Mabey Compact-200 como sobrepuentes para facilitar el paso del transporte especial sin que se vea afectada la estructura original.

En España, el Ministerio de Fomento no deja redactar un informe que contemple varias alternativas de paso, obliga a la redacción de una única ruta de paso y la viabilidad de la misma (Nota Servicio M.F. 2/2014)

Si la ruta ha de ser modificada, se deberá de solicitar una variación de la misma a la DGT para que comunique a los distintos organismos afectados la variación de la misma. No se puede solicitar una ruta y luego en el estudio específico presentar otra distinta.

3.5. Actividad de campo

Una vez que se conocen las dimensiones del transporte y la ruta, es OBLIGATORIO un recorrido de la misma por el redactor del estudio, que deberá ir acompañado por personal de la empresa transportista o con la empresa encargada del mantenimiento de la vía, con un vehículo preparado a tal efecto para poder estacionar en los puntos críticos y, tomar las mediciones de anchura o gálidos que considere puedan ser objeto de estudio. Comprobar el estado de la señalización que pueda verse afectada y la posibilidad de su retirada y nueva colocación. Se deberá de hacer un reportaje fotográfico de cada punto de estudio y a lo largo del recorrido y además se comprobará la no existencia de obras puntuales que imposibiliten el paso del transporte.

3.6. Criterios para el estudio específico de las maniobras especiales

Con los datos tomados en campo, se comenzará a preparar el estudio específico en la oficina técnica para ello son necesarios los siguientes datos

- Cartografía del itinerario.
- Ortofotos del itinerario.
- Fotografías del recorrido en sus puntos críticos.
- Diseño del vehículo en planta y alzado

Para disponer de estos datos generalmente se recurre a la propia cartografía que disponen las diferentes Comunidades Autónomas o el propio Ministerio de Fomento, el problema es que en muchos casos están obsoletas y es necesario dibujar sobre ellas las variaciones existentes en base a las medidas realizadas con la toma de datos en campo.

En cuanto al diseño del vehículo existen programas informáticos comerciales que admiten diferentes tipos de cabezas tractoras y semirremolques, el problema es que son todos americanos y se rigen por su propia normativa, American Association of State Highway and Transportation (AASTHO).

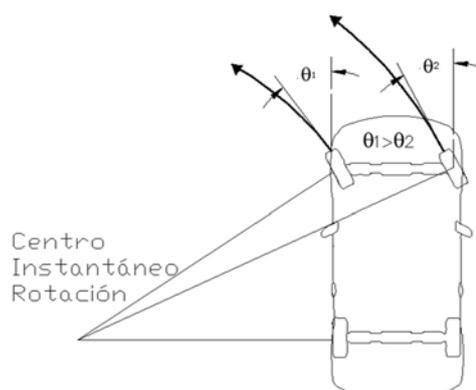
Otra forma de acometer el problema es mediante el uso de programas de cálculo que generen matrices de giro dando el resultado de las posiciones sucesivas del vehículo.

4 Maniobras a baja velocidad

Se analiza a continuación como se estudia una maniobra de un vehículo articulado para que el proyectista pueda optimizar y obtener las posiciones del vehículo al maniobrar programar el resultado en el caso que no quiera utilizar programas comerciales.

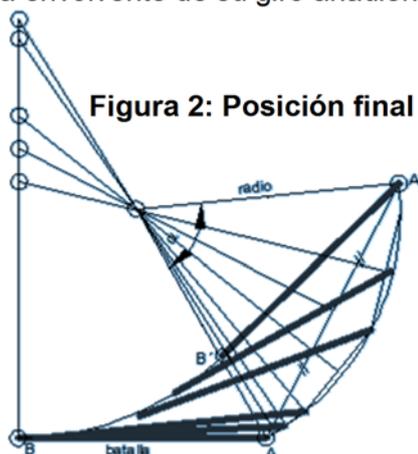
Se realizan las siguientes abstracciones cinemáticas y dinámicas. Los giros son curvas prácticamente planas por lo que se trabaja en 2D, cuyo centro instantáneo de rotación (CIR) en cada punto, correspondiente de la trayectoria para un instante t de tiempo, se puede definir como el centro de la circunferencia osculatriz. Se recoge en la Figura 1 un ejemplo del cálculo del centro instantáneo de rotación para un instante t . Los valores que definen el CIR son por tanto la batalla (distancia entre ejes) y el ángulo de giro de las ruedas directoras.

Figura 1: CIR



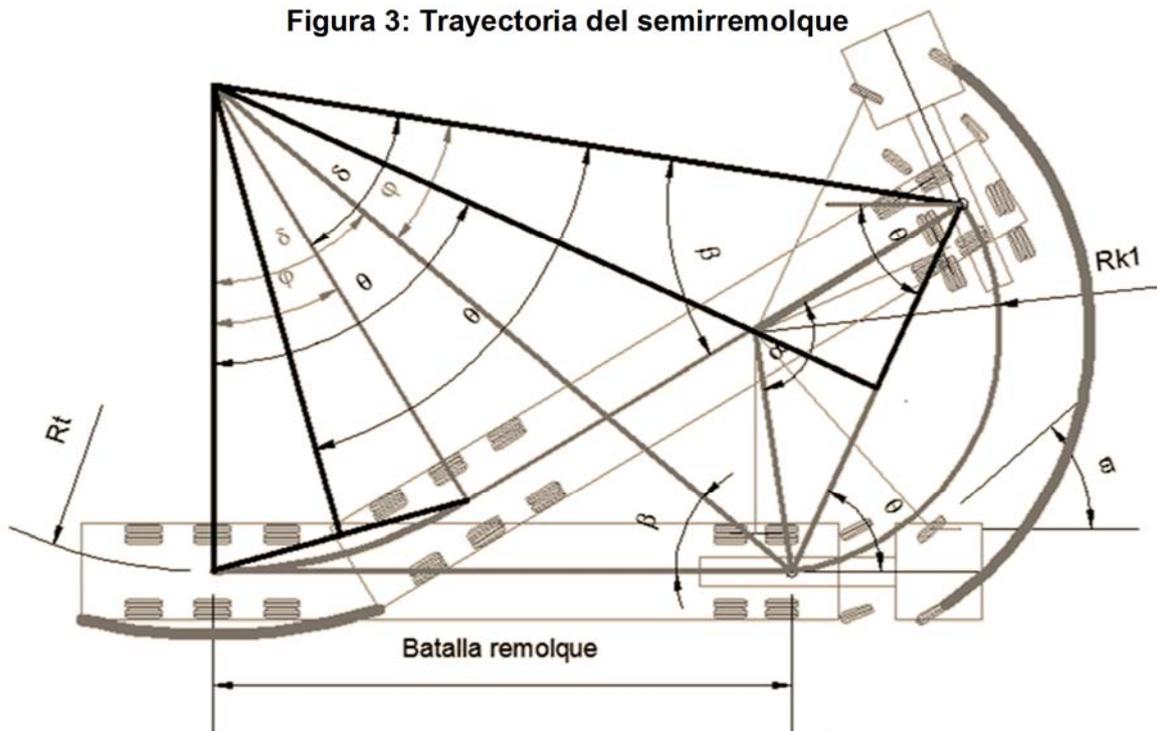
El ángulo de giro de cada rueda es distinto debido a que realizan diferentes trayectorias. Para una cabeza tractora convencional el giro máximo de las ruedas directrices está comprendido entre 40 y 55 grados sexagesimales.

En la Figura 2, se puede observar que si se va moviendo el vehículo para varios instantes t de tiempo, podemos conseguir la posición inicial y final y poder trazar la trayectoria que describe el vehículo y la envolvente de su giro añadiendo la carrocería.



Para el semirremolque, Figura 3, la situación es más complicada, debido a que está unido a la cabeza tractora a través de la 5ª rueda o "kingpin" y la distancia constante y limitada por el ángulo máximo que pueden formar ambos (tractor y semirremolque). Se trabaja calculando un eje trasero equivalente.

Figura 3: Trayectoria del semirremolque



Una forma de programar el giro del semirremolque en función del giro que tiene en ese mismo instante t de tiempo las ruedas directrices de la cabeza tractora es mediante la programación de **una curva de persecución** en la cual la distancia entre perseguido y perseguidor es constante e igual a la batalla del semirremolque.

En el estudio de la curvatura, la ecuación diferencial que define el movimiento de la cabeza tractora es:

$$\frac{d\alpha}{dS} = \frac{1}{r} \quad (1)$$

La ecuación diferencial que define el movimiento del semirremolque, estará relacionada con esta y queda definida por la ecuación 2.

$$\frac{d\phi}{dSt} = \frac{1}{Rt} \quad (2)$$

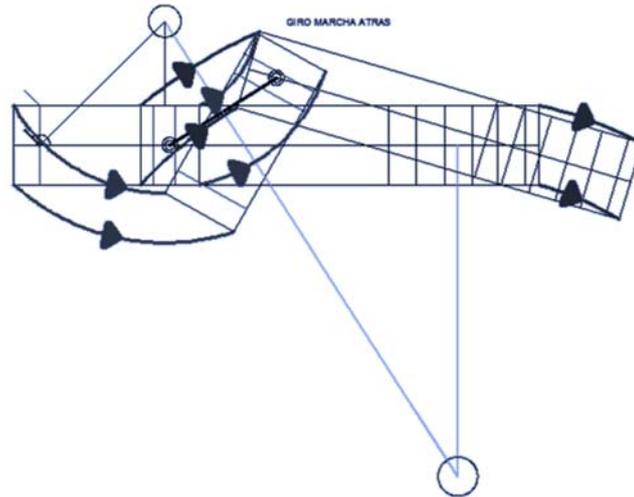
Uniendo la ecuación 1 y 2, obtendremos una relación entre la trayectoria de la cabeza tractora y el semirremolque

$$\frac{d\phi}{dSt} = \frac{1}{r} \pm \frac{\text{sen}\phi}{\text{batalla semiremolque}} \quad (3)$$

Recogidos en la Figura 3, donde S es la trayectoria, r el radio de giro y α el ángulo en radianes para la cabeza tractora y, St , Rt y φ para el semirremolque,

Para la trayectoria que describe el semirremolque se utilizará el signo negativo cuando es marcha adelante y el signo positivo cuando es marcha atrás, Figura 4. Por tanto el movimiento no es el mismo, de ahí la gran dificultad para volver a la posición original en caso de no ser realizada la maniobra correctamente en un primer intento.

Figura 4: Giro marcha atrás



Si se estudia el movimiento del semirremolque como una curva de persecución en la cual el eje equivalente persigue a la 5ª rueda o "kingpin", cuando esta realiza un movimiento circular, las ecuaciones que se obtienen son las siguientes:

$$X_{n+1} = X_n + k\sqrt{(p_{n+1} - p_n)^2 + (q_{n+1} - q_n)^2} * \frac{p_n - X_n}{\sqrt{(p_n - X_n)^2 + (q_n - Y_n)^2}} \quad (4)$$

$$Y_{n+1} = Y_n + k\sqrt{(p_{n+1} - p_n)^2 + (q_{n+1} - q_n)^2} * \frac{q_n - Y_n}{\sqrt{(p_n - X_n)^2 + (q_n - Y_n)^2}}$$

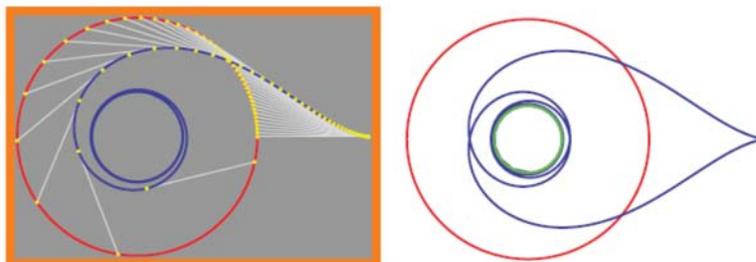
En donde el valor k es la relación de velocidades entre perseguido y perseguidor, en este caso es igual a 1, X_i e Y_i son las posiciones inicial y final, en coordenadas cartesianas del eje equivalente trasero y p_i , q_i es la trayectoria que describe el "kingpin", un movimiento circular.

$$\frac{1}{\sqrt{(p_n - X_n)^2 + (q_n - Y_n)^2}} \quad (5)$$

El valor de la ecuación (5) se puede sustituir por una constante definida como la distancia entre el kingpin y el eje equivalente trasero, valor conocido como batalla del semirremolque.

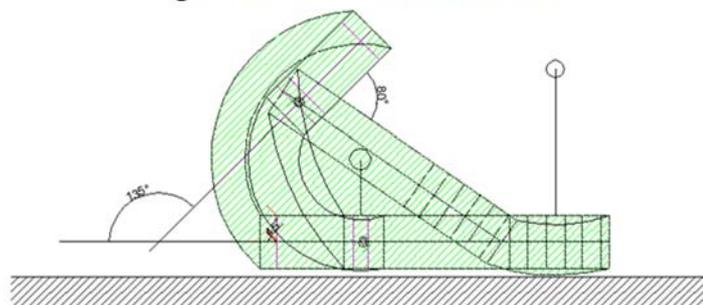
En la Figura 5, se muestran las distintas trayectorias que se generan en función del valor de la batalla del semirremolque. La curva generada por la trayectoria del semirremolque se denomina tractriz.

Figura 5: Trayectorias del semirremolque



Para vehículos de gran longitud, es interesante el estudio de la desviación trasera que sufre el semirremolque al efectuar el giro, cuya traducción es "swing out". Figura 6.

Figura 6: Desviación trasera



5 Resultados y desarrollos futuros

5.1. Resultados

Una vez localizados los puntos críticos más característicos objeto del estudio específico, se deberán de plantear las soluciones y viabilidad de paso del transporte justificando de manera documental según los cálculos efectuados y la propia experiencia del proyectista.

En la Figura 7 se recoge el diseño de un transporte con carga, en planta y alzado, necesario para poder estudiar posteriormente los distintos puntos críticos.

En algunos casos, será necesario la retirada de la señalización vertical existente, se sabrá una vez recorrido el itinerario del transporte, en otros la viabilidad de la maniobra será en planta, Figura 8. En otros casos será en alzado, Figura 9.

Cuando el problema es debido a la masa máxima autorizada habrá que re-calcular las estructuras y determinar que está no se verá afectada al paso del transporte.

Figura 7: Ejemplo diseño del transporte especial y la carga

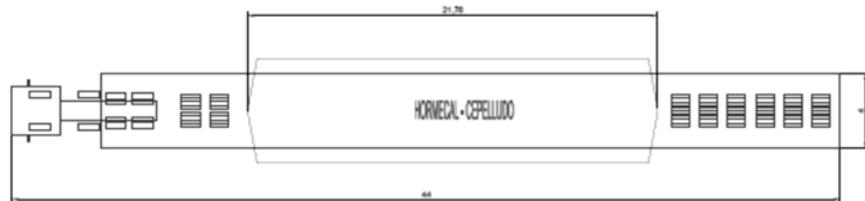
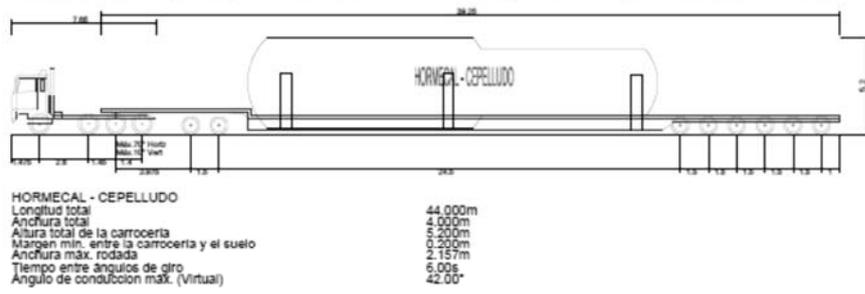
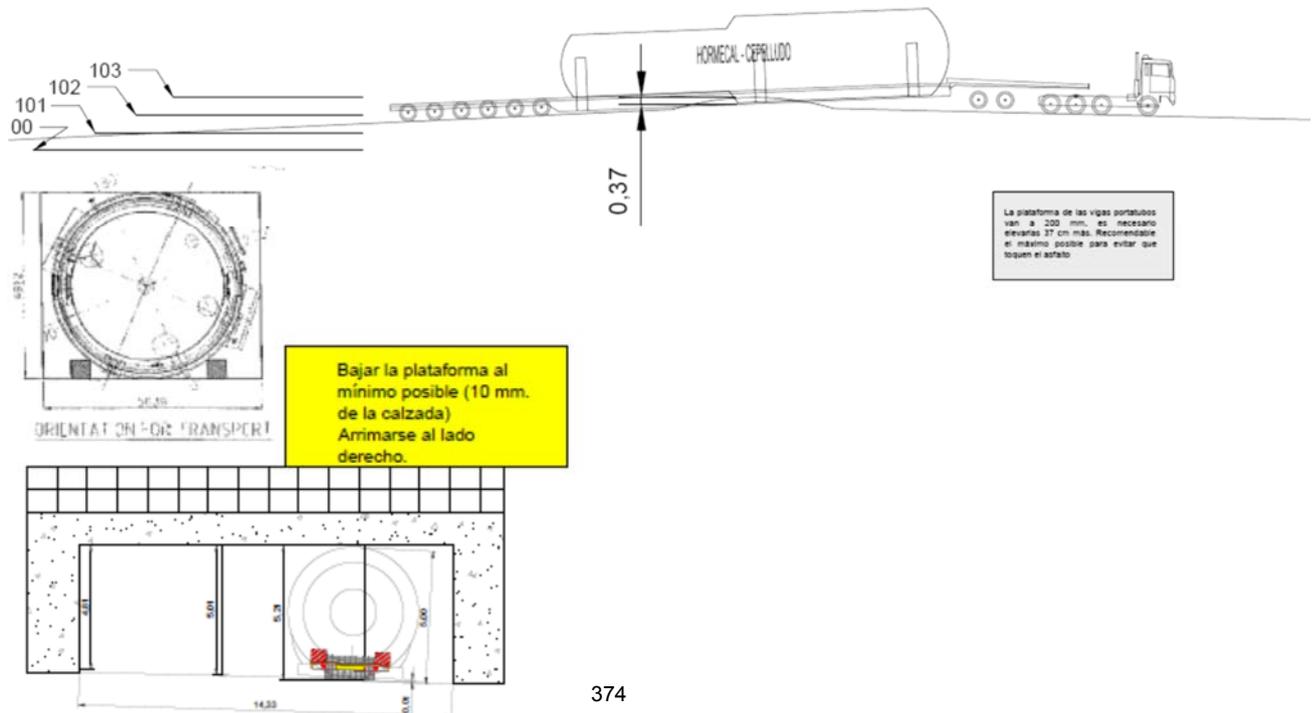


Figura 8: Ejemplo viabilidad de paso en planta



Figura 9: Ejemplo viabilidad de paso en alzado



5.2. Desarrollos futuros

El conjunto formado por la plataforma y una o varias cabezas tractoras es un vehículo tecnológicamente complejo que en un futuro no muy lejano podrá tener programadas previamente maniobras específicas para que se realicen de forma autónoma, y no sea necesario un desarrollo previo de los giros o bien in situ con sensores ópticos y aplicaciones informáticas que posibiliten la maniobra como existe en vehículos convencionales para realizar un estacionamiento en la vía pública.

Otro aspecto interesante es dotar de sensores a la plataforma y, mediante un programa informático poder revertir la maniobra marcha atrás de manera automática para volver a la posición original de partida, lo que facilitaría en gran medida la operatividad del conductor que tendría un control total sobre la plataforma y en caso de ser necesario repetir la maniobra.

6 Conclusiones

Se realiza una propuesta metodológica para la resolución de problemas que se plantean actualmente para el transporte de grandes mercancías por carretera. Estos transportes se hacen en horario nocturno, con vehículos piloto y escolta, además de los inconvenientes que se ocasionan al usuario de las vías. Es muy importante que el estudio de viabilidad recoja los problemas con los que se encontrará el transporte junto con las soluciones previstas en cada caso, tanto de giros como señalización, cableado, etc.

Dado que uno de los problemas principales es el trazado de las trayectorias curvas tanto horizontales como verticales (cambios de rasante) se propone para las horizontales la aplicación de curvas de persecución de modo que se resuelvan analíticamente de forma más estricta optimizando la precisión del trazado que el vehículo realizará sobre la calzada.

Para las trayectorias verticales, se presentan mejoras para resolver dichas situaciones en las que se puedan controlar cuando se produce un contacto con el pavimento.

7 Referencias

- Amit Ailon, Nadav Berman, Shai Arogeti, (2005). On controllability and trajectory tracking of a kinematic vehicle model, *Automatica*, 41, 889-896.
- Antos P, Ambrósio J., (2004). A Control Strategy for Vehicle Trajectory Tracking Using Multibody Models.
- Caracciolo L, De Luca A, Iannitti S., (1999, Mayo). Trajectory Tracking Control of a Four-Wheel Differentially Driven Mobile Robot. *IEEE*, 2632-2638
- EEUU, AASHTO (2001) A policy on geometric design of Highways and Streets.
- España. Orden 3.1 I.C. Trazado, de 27 diciembre de 1999 por la que se aprueba la norma 3.1-IC. Trazado, de la Instrucción de Carreteras.
- Gómez-Bravo F, Cuesta F y Ollero A. (2000). Planificación de Aparcamiento Paralelo y diagonal Usando Curvas Beta-Splines. *Jornadas de Automática. Santander, España.*
- Gómez-Bravo F, Cuesta F y Ollero A. (2001). Planificación de Maniobras Restringidas en Vehículos con Remolque. *Jornadas de Automática. Barcelona, España.*

