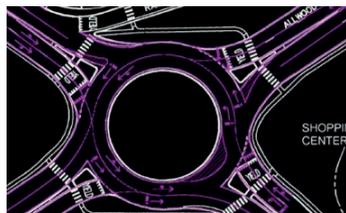


# Orientaciones para la corrección de deficiencias de funcionamiento en glorietas en servicio



Guidance for the correction of functional deficiencies at operational roundabouts

## Comité Técnico de Seguridad Vial

Asociación Técnica de Carreteras

Redactado por:

**Juan Luis Rubio Martín**

*Dr. ICCP*

*Jefe de Proyecto en Infraestructuras del Transporte (AYESA)*

**Rafael Jurado Piña**

*Dr. ICCP*

*Profesor titular de Universidad (UPM)*

**José María Pardillo Mayora**

*Dr. ICCP*

*Profesor titular de Universidad (UPM)*

Redactor del prólogo:

**Roberto Llamas Rubio**

*DGC- Presidente del Comité de Seguridad Vial*

Las glorietas son una de las soluciones más extendidas en las últimas décadas para resolver las intersecciones a nivel en carreteras convencionales. Dicha disposición presenta ciertas ventajas respecto al funcionamiento de una intersección convencional si bien, en determinados casos, pueden presentar problemas de funcionamiento y seguridad que son susceptibles de mejora si se identifican y se corrigen las carencias de diseño que los originan. Y las correcciones o mejoras de funcionalidad y seguridad pueden llevarse a cabo con pequeñas modificaciones en su diseño que no suponen un coste elevado.

Estos aspectos se abordan en el presente artículo. Por un lado, se pasa revista a las bases generales en las que se fundamenta un adecuado diseño de las glorietas, a partir del análisis de las principales guías internacionales. También, se resumen las principales experiencias en los estudios sobre los efectos obtenidos con la corrección de las deficiencias de diseño de glorietas en servicio con problemas de funcionamiento. Y, por último, se estudian dos casos ilustrativos de glorietas en servicio en las carreteras españolas que presentan problemáticas habituales de capacidad y elevadas velocidades, proponiéndose medidas de bajo coste para mejorar esas disfuncionalidades.

In recent decades roundabouts have become one of the most widely adopted solutions for at-level junctions on conventional roads. While their configuration affords operational advantages with respect to conventional intersections, in certain cases roundabouts may experience operational and safety problems that are susceptible to improvement if the design deficiencies that originate them are identified and corrected. As a result, functional and safety improvements can be achieved with low-cost minor design changes.

The present article addresses these issues. First, the main principles for a sound design of roundabouts resulting from a review of international guidelines are presented. Next, the main conclusions of the studies of the correction of design deficiencies at in-service roundabouts with operational problems are summarized. And, finally, two illustrative cases of in-service roundabouts on Spanish roads experimenting frequent capacity and speeding problems are analysed, and low-cost corrective measures are proposed.

## Prólogo

Los nudos y, especialmente, las intersecciones a nivel son puntos de conflicto desde el punto de vista de la seguridad de la circulación. En ellas confluyen maniobras que en sí mismas suponen un riesgo de accidente: giros, cruce de carriles, etc. Por ello, a estos puntos debe prestarse especial dedicación para diseñarlos de la forma más segura para realizar dichas maniobras y sean bien entendibles por los conductores.

Una tipología de nudo a nivel muy extendida en las carreteras convencionales son las glorietas o, más comúnmente denominada por los usuarios, "rotondas". Son una tipología que se ha evidenciado como de las más seguras, especialmente, en zonas perirurbanas o urbanas, con una buena capacidad y facilidad para la realización de movimientos que permitan incorporaciones y salidas por sus ramales con una cierta comodidad y menor riesgo. No obstante, como en todo, pueden existir ciertas disfuncionalidades que en algunos casos pueden resolverse con pequeñas actuaciones de bajo coste sobre la geometría y su señalización, ganando en capacidad y seguridad.

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que una gran parte de los accidentes en las glorietas se producen en sus entradas, por lo que medidas tendientes a reducir la velocidad en sus aproximaciones, mejorar la percepción de los carriles y de la calzada giratoria son sumamente eficaces para mejorar el funcionamiento y seguridad en las mismas. Y existen actuaciones de coste bajo o moderado muy interesantes aplicar, tales como mejora de la señalización horizontal con marcas viales de selección de carriles, refuerzo de la señalización vertical, implantación de reductores de velocidad o bandas transversales de alerta.

Así pues, en el presente artículo se analiza algunas de las disfuncionalidades más habituales en este tipo de intersección, así como los efectos potenciales que pequeñas modificaciones en el diseño de las glorietas tienen sobre los niveles de servicio y seguridad, basado en el estudio de experiencias internacionales. También se muestran varias soluciones de ese tipo para dos casos concretos de glorietas en servicio con problemas de capacidad y elevadas velocidades.

Su lectura nos permitirá familiarizarnos con los problemas más habituales del diseño de las glorietas y adentrarnos en sus posibles soluciones, ya que las guías por sí solas no resultan suficientes para resolver todos los posibles condicionantes locales que pueden presentarse y que de no contemplarse adecuadamente generarán pérdidas de funcionalidad y seguridad en la fase de explotación.

Por último, como Presidente del Comité Técnico de Seguridad Vial de la Asociación Técnica de la Carretera, quisiera expresar mi agradecimiento a los autores de este artículo, por el trabajo llevado a cabo, por su esfuerzo y dedicación, ya que estoy seguro que contribuirá a plantearse cuestiones apuntadas en el artículo y mejorar el diseño de las futuras glorietas y el funcionamiento de las actuales que se encuentran en servicio y presentan ciertas carencias.

**Roberto Llamas Rubio**

Presidente

Comité Técnico de Seguridad Vial  
Asociación Técnica de Carreteras

## 1. Introducción

En los últimos cuarenta años se ha generalizado el empleo de glorietas como alternativa a las intersecciones a nivel convencionales en gran parte del mundo. Las glorietas constan de una calzada anular que canaliza los flujos procedentes de tres o más accesos estableciéndose una circulación prioritaria de sentido único alrededor de una isleta central de forma que todos los movimientos entrada y de salida son giros a derechas. La experiencia acumulada en países de todo el mundo demuestra que en muchas situaciones esta disposición presenta

ventajas respecto al funcionamiento de una intersección convencional.

En España, la primera glorieta fue construida en 1976. Desde entonces la implantación de glorietas se ha desarrollado a un ritmo creciente, sobre todo tras la aprobación en 1990 de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial en la que se concedía la prioridad a los vehículos que circulan por la calzada anular. En la actualidad en España existen más de 35000 glorietas en servicio, lo que nos sitúa entre los países con mayor número de intersecciones de este tipo en el mundo.

A pesar de esta dilatada experiencia, en algunos casos las glorietas en servicio presentan problemas de funcionamiento y seguridad que son susceptibles de mejora si se identifican y se corrigen las carencias de diseño que los originan.

El proyecto de una glorieta es una tarea compleja que requiere múltiples iteraciones hasta satisfacer una serie de objetivos, a veces contrapuestos. Además, un buen diseño requiere integrar todos los elementos y objetivos de manera que el conjunto sea coherente, es decir, una concepción global del proyecto.

Para llevar a cabo esta tarea, las guías y las normas de diseño contrastadas internacionalmente son un excelente recurso, pero por sí solas no resultan suficientes ya que la mayor parte de las glorietas presentan unas condiciones particulares que frecuentemente resultan difíciles de ajustar a los estándares. Por ello, aun partiendo de los fundamentos que se deducen de la experiencia acumulada en el diseño de glorietas, resulta necesario estudiar con detalle cada caso particular para alcanzar una solución que satisfaga todos los condicionantes locales y evite pérdidas de funcionalidad y problemas de seguridad vial en la etapa de explotación. Cuando a pesar de todo se presentan estos problemas en las glorietas en servicio, resulta pertinente analizar las posibilidades de mejora del diseño y cuantificar su efecto en las condiciones de operación y de seguridad.

En este artículo se describen en primer lugar las bases que fundamentan el diseño de una glorieta sintetizadas a partir de las propuestas recogidas en los principales manuales y guías internacionales. A continuación, se resume la experiencia internacional sobre los efectos de la corrección de las deficiencias de diseño de glorietas en servicio con problemas de funcionamiento. Finalmente, en el apartado 4, se presentan dos casos de estudio que resultan ilustrativos de problemáticas que aparecen con cierta frecuencia en las carreteras españolas.

## 2. Bases generales del diseño de glorietas

### 2.1. Introducción

El proyecto de una glorieta se suele llevar a cabo tomando como datos de partida los valores de una serie de parámetros geométricos. Los parámetros usualmente empleados se representan en la Figura 1. Una vez

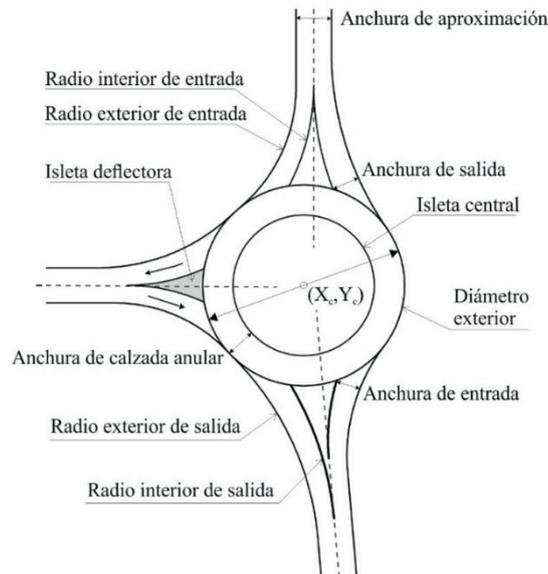


Figura 1. Parámetros geométricos

establecida la geometría se pueden obtener los valores de otros parámetros geométricos utilizados para evaluar el funcionamiento de la circulación en la glorieta, como el ángulo de entrada, que se determina trazando las tangentes a las líneas medias de la calzada en la entrada y en el anillo.

El proyecto debe abordar además la definición y el acondicionamiento de los itinerarios y los puntos de cruce de peatones y ciclistas cuando hay presencia de estos tipos de usuarios. Básicamente, se deben aplicar unos criterios generales de diseño que contemplen al menos los siguientes aspectos (Johnson, 2017):

- Relación entre el diseño y la capacidad.
- Influencia del trazado en la seguridad.
- Criterios generales de señalización.

### 2.2. Relación entre el diseño y la capacidad

La capacidad es el primer condicionante a considerar en el diseño de una glorieta, antes de especificar los detalles de su trazado. Es preciso es-

tablecer a priori el número mínimo de carriles en las entradas y en la calzada anular de manera que se pueda garantizar un adecuado nivel de servicio en las entradas bajo la demanda de tráfico prevista.

Los métodos de cálculo de la capacidad suelen proporcionar expresiones que relacionan la intensidad máxima que puede incorporarse por una entrada con el tráfico en la calzada anular frente a ella, o flujo de conflicto. Los factores que determinan la capacidad de una entrada son (Akcelik, 2008): los flujos de conflicto, el comportamiento de los conductores y la geometría de la glorieta. Otros factores que también hay que tener en cuenta son la presencia de peatones y la señalización. Los modelos internacionales desarrollados para evaluar la capacidad de una entrada consideran estos factores y pueden clasificarse en dos categorías:

- Modelos basados en la geometría: Se definen posibles relaciones funcionales entre la capacidad y el flujo de conflicto con coeficientes que dependen de la geometría de la glorieta y cuyos valores se obtienen mediante técnicas de regresión a partir de datos tomados

en glorietas saturadas. Los parámetros geométricos empleados como variables explicativas y que suelen resultar estadísticamente significativos son (Kimber, 1980): la anchura de la entrada, la anchura de la aproximación, la longitud del abocinamiento en la entrada, el diámetro exterior, el ángulo de entrada y el radio exterior de entrada. A excepción del ángulo de entrada, todos presentan una relación creciente con la capacidad. Los parámetros con mayor influencia en la capacidad son: la anchura de la entrada, la anchura de la aproximación y la longitud del abocinamiento en la entrada.

- Modelos basados en la geometría y el comportamiento del conductor: Estos tipos de modelos son probabilistas y se fundamentan en la teoría de aceptación del hueco. Esta teoría utiliza principalmente dos variables en la estimación de la capacidad de una entrada: la distribución de los intervalos temporales entre vehículos consecutivos de la corriente prioritaria y el grado de aprovechamiento de los huecos existentes en el flujo prioritario por los conductores que acceden a él desde la entrada. Este grado de aprovechamiento de los huecos se puede estimar mediante dos variables: el intervalo crítico y el intervalo entre vehículos sucesivos. El intervalo crítico se refiere a un valor del intervalo entre vehículos consecutivos de la corriente prioritaria para el cual el 50% de los conductores que se encuentran en la entrada decidiría incorporarse a ella. El intervalo entre vehículos sucesivos se corresponde con el valor medio del intervalo entre vehículos que situados inicialmente en cola en la entrada se incorporan de forma sucesiva a la corriente prioritaria aprovechando un mismo hueco en ella.

Los modelos de aceptación del hueco captan en mayor o menor

Elemento de diseño	Capacidad
Diámetro exterior grande	Aumenta
Aumento de la anchura de la calzada anular	Aumenta
Aumento de la anchura de la entrada	Aumenta
Radio del borde exterior de entrada grande	Aumenta
Ángulo entre accesos grande	Disminuye
Bajo ángulo de entrada	Aumenta
Aumento gradual de la anchura en la entrada	Aumenta

grado la geometría de la intersección. Las guías de E.E.U.U. (NCHRP, 2010) y Alemania (Brilon y Wu, 2008) proporcionan modelos independientes dependiendo del número de carriles y de las dimensiones de las calzadas de los accesos y del anillo giratorio. En Australia (Akcelik, 2004) se considera además la influencia de otros factores como el radio de entrada y el ángulo en la trayectoria de entrada.

Tradicionalmente en España se han utilizado modelos de estimación de la capacidad basados en la geometría de la glorieta. Por ello se ha decidido emplear en el análisis de los casos prácticos que se exponen más adelante un método de estas características.

A modo de resumen en la Tabla 1 se describe el sentido en el que cada uno de los parámetros geométricos afecta a la capacidad de las entradas (Kuhlow, 2011).

### 2.3. Influencia del trazado en la seguridad

Una vez establecida la configuración más adecuada de los carriles para dotar a la glorieta de una suficiente capacidad se puede proceder a su diseño geométrico. Éste debe perseguir los siguientes objetivos (NCHRP, 2010):

- Conseguir una moderación de las velocidades de circulación en la aproximación y paso por la glorieta desde todas las entradas, así

como una adecuada consistencia de velocidades. Este aspecto es clave para la seguridad y condiciona de manera significativa la geometría final de la glorieta (AUSTROADS, 2011).

Su análisis no se aborda de la misma manera en todas las guías de diseño. La tendencia actual consiste en determinar las trayectorias de los vehículos que, subjetivamente, se consideran más rápidos, estimar posteriormente las velocidades a lo largo de estas trayectorias, y finalmente comprobar que los valores máximos de la velocidad y de la consistencia evaluada conforme a unos indicadores preestablecidos son satisfactorios. Esta comprobación es muy laboriosa y en la Norma 3.1.-IC de Trazado no se especifica ningún procedimiento para realizarla. Rubio et. al (2019) proponen una metodología que permite llevar a cabo esta tarea de una manera automatizada.

En general, la consecución de una adecuada moderación y consistencia de velocidades queda muy condicionada por la posición relativa de la calzada anular y de las entradas, que debe perseguir la presencia de inflexiones en las trayectorias de los vehículos.

- Proporcionar un guiado eficiente de los vehículos en glorietas multicarril de forma que la circulación sea intuitiva y cada usuario utilice, en función del carril elegido en la entrada, el que corresponda de la

Tabla 2. Relación entre parámetros de diseño geométrico y seguridad

Elemento de diseño	Seguridad
Diámetro exterior grande	Menos seguro
Aumento de la anchura de la calzada anular	Menos seguro
Aumento de la anchura de entrada	Menos seguro
Radio del borde exterior de entrada grande	Menos seguro
Elevado ángulo entre accesos	Más seguro
Bajo ángulo de entrada	Menos seguro
Aumento gradual de la anchura en la entrada	Neutro

calzada anular, evitando la ocupación parcial de carriles adyacentes. Chlewicki (2017) resalta la importancia de una adecuada canalización de los movimientos ya que previene movimientos erráticos y disminuye la probabilidad de accidentes.

Para evitar que las trayectorias de los vehículos que entran en la glorieta por diferentes carriles se crucen en la calzada anular debido a que alguno de ellos no sigue la trayectoria natural que le corresponde, unas medidas eficientes son el incremento de los valores de los radios exteriores de entrada y de salida, el realineamiento de la entrada, la modificación del ángulo de entrada o la implementación de una nueva señalización.

- Garantizar el paso de los vehículos de mayores dimensiones que vayan a circular por la glorieta. Se facilita el paso conforme aumentan de tamaño los elementos de la glorieta, en particular la calzada anular y los carriles de entrada y salida, lo que va en detrimento de la moderación de velocidades y puede tener efectos adversos en la seguridad.

En planta, la introducción de un espacio extra como el proporcionado por un gorjal facilita el paso por la glorieta de los vehículos sin necesidad de incrementar la anchura de la calzada anular. El trazado en alzado debe garantizar que el bastidor de los vehículos más largos no roce con el pavimento.

- Acomodar a todos los modos de transporte, lo cual requiere la consideración en el diseño de los elementos necesarios para la implantación de los itinerarios peatonales y de ciclistas. Frecuentemente la presencia de estos itinerarios influye en el tamaño de las isletas deflectoras cuando éstas deben dar refugio a peatones o ciclistas.

Los principios generales que rigen el acomodo de los peatones y los ciclistas en las glorietas son (NCHRP, 2010): minimizar y simplificar los itinerarios, proporcionar una adecuada ubicación de las aceras y de los carriles bici, implantar pasos de peatones-ciclistas por las calzadas de acceso y proporcionar en la isleta deflectoras una zona de refugio que facilite la operación de cruce.

- Proporcionar unas buenas condiciones de visibilidad para que el conductor tenga una buena percepción de la intersección y de otros usuarios con los que puede entrar en conflicto.

Además, varias investigaciones, entre las cuales cabe destacar el extenso estudio realizado por Maycock y Hall (1984), establecen otros aspectos del diseño cuya consideración contribuye a la mejora de la seguridad:

- Minimización del número de accesos.
- Equilibrio de las distancias entre los accesos consecutivos.

- Control de algunos ángulos en unos ciertos rangos, en particular el que forma la trayectoria del vehículo que accede a la calzada anular con la del vehículo que circula por ella y el correspondiente al giro de la cabeza de un conductor desde la posición de entrada para que pueda divisar a otros aproximándose.

- Iluminación de la glorieta.

Como en el caso anterior, y a modo de resumen, se presenta en la Tabla 2 el sentido en el que cada uno de los parámetros geométricos influye en la seguridad viaria (Kuhlow, 2011).

Si se compara la información de la Tabla 2 con la de la Tabla 1 se deduce que las variaciones en las dimensiones de los elementos del diseño influyen, en muchos casos, en sentido inverso en las condiciones de capacidad y de seguridad. Esto refuerza la idea de que el diseño de una glorieta se debe realizar desde una perspectiva global, mediante la búsqueda de unos valores de los parámetros de diseño que satisfagan de manera equilibrada tanto los criterios de seguridad como los de capacidad, proceso que se puede convertir en un problema de optimización del trazado. Rubio et al (2014) proponen la aplicación de una técnica heurística de optimización en el diseño de glorietas que permite obtener la geometría de una glorieta de manera automatizada.

## 2.4. Criterios generales de señalización

La señalización regula los flujos de tráfico y facilita la integración de otros modos diferentes a los vehículos automóviles. Es un elemento crítico del diseño que tiene gran influencia en la seguridad y que puede mejorar igualmente la capacidad de las entradas. Debe concebirse de manera simultánea a la definición

del trazado en la fase de proyecto y, como en el caso de la geometría, es difícil de estandarizar.

Los principios básicos de una buena señalización en las carreteras son (MF, 2014): claridad, sencillez, uniformidad y continuidad. En el caso particular de las glorietas, Hawkins (2011) establece que la señalización debe reforzar los efectos buscados con el diseño geométrico mediante mensajes que persigan las siguientes finalidades:

- En las aproximaciones: ayudar a los conductores a situarse en el carril adecuado, advertir de la presencia de la glorieta y facilitar el tránsito de peatones.
- En las entradas: establecer el sistema de prioridad y la dirección del recorrido.
- En la calzada anular: informar de los tipos de movimientos permitidos y facilitar las salidas.
- En las salidas: confirmar el destino deseado y establecer los itinerarios peatonales.

Estos principios tienen aplicación en los países en que los conductores seleccionan el carril apropiado al destino elegido en las aproximaciones, con el objeto de evitar movimientos de cambio de carril en la calzada anular. En el caso de España, la Guía de Nudos Viarios (MF, 2012) recomienda utilizar el denominado método "Alberta", que consiste en prolongar la línea de separación de los carriles de la calzada anular a través de las salidas. En los accesos recomienda que se utilicen las flechas de carril para asistir al conductor en la selección del carril correcto (Fig. 2). Bill (2017) expone como causa común de accidentes la elección incorrecta del carril en la aproximación, para cuya corrección es imprescindible diseñar de manera adecuada la señalización.

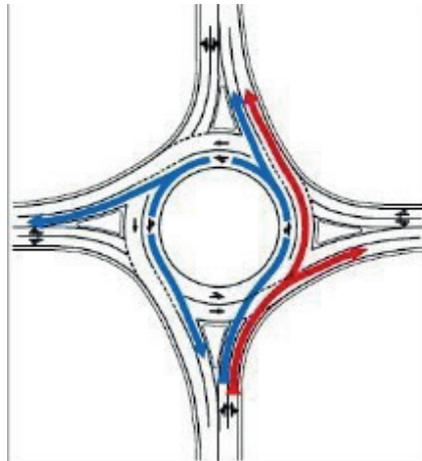


Figura 2. Señalización horizontal en glorietas. Fuente: MF, 2012

Sin embargo, esta forma de funcionamiento no es compatible con la interpretación que actualmente hacen las autoridades de tráfico del Reglamento de Circulación en España, que consideran que la salida de la calzada anular debe realizarse siempre desde el carril exterior, lo cual es difícil de llevar a la práctica cuanto las glorietas tienen un tamaño pequeño o moderado.

### 3. Efectos potenciales de la corrección de las deficiencias de diseño de glorietas en servicio con problemas de funcionamiento

En la literatura científica se pueden encontrar diferentes estudios en los que se analiza el impacto sobre los niveles de servicio y la seguridad de modificaciones menores del diseño de glorietas en servicio que presentan un funcionamiento deficiente. Se describen a continuación algunos de ellos, entendiendo como modificaciones menores aquellas de poca entidad que no persiguen una reforma integral de la intersección. Pueden afectar a la geometría o simplemente a la señalización.

Relacionados con la modificación de la geometría, Price y Rust (2011) presentan varios casos de EE.UU. en los que se consigue una mejora

significativa del control de las velocidades y del guiado de los vehículos mediante unas correcciones menores del trazado. En la Fig. 3 se muestra un ejemplo de este estudio en el que se propone la mejora del trazado de una glorieta de tres patas mediante el realineamiento de las entradas y las salidas y la implantación de un giro segregado directo. El impacto en el entorno es reducido. Según los autores es importante evitar puntos angulosos en la delimitación de los bordes de las calzadas.



Figura 3. Correcciones en la geometría para mejorar el diseño. Fuente: Price y Rust, 2011

En la misma línea, Vorisek (2011) presenta un caso de estudio de una glorieta en EE.UU. con problemas en la regulación de la prioridad, elevadas velocidades en las entradas e inadecuada canalización de los movimientos (Fig. 4a). En este caso se aplicaron dos tipos de mejoras. En primer lugar, se modificó la señalización horizontal en los accesos y en la calzada anular (Fig. 4b), pasando esta última a tener una anchura variable; posteriormente, se modificó el trazado de las entradas (Fig. 4c) con el objetivo de introducir unas inflexiones en las trayectorias de los vehículos. Tras la puesta en servicio de estas medidas se constató una buena moderación de las velocidades de los vehículos a su paso por la glorieta, una mejora notable en el funcionamiento de la regulación de los flujos en las entradas y un guiado eficiente de los vehículos acorde con las trayectorias naturales.

En relación a las guías de diseño de glorietas, cabe destacar las pro-



Figura 4. Correcciones del trazado y de la señalización (a) la situación original (b) modificación de la señalización (c) modificación de la geometría. Fuente: Vorisek (2011)

puestas del estado de Queensland (Australia) para favorecer la presencia de deflexiones en el perfil de velocidades de los vehículos en la aproximación y paso por la glorieta. Consisten en la modificación de la anchura de la calzada en las entradas de forma que se generen inflexiones en las trayectorias de los vehículos y en la implantación de curvas sucesivas de distinto sentido en las aproximaciones a la glorieta (Fig. 5).

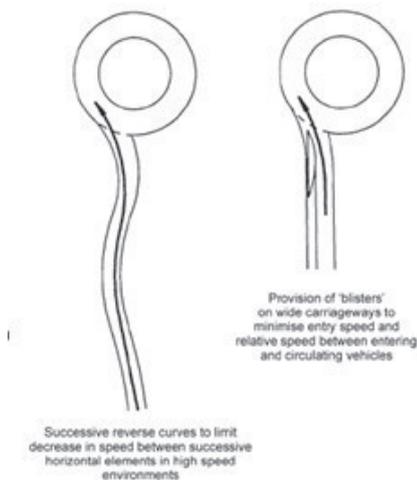


Figura 5. Mejora de la geometría en las entradas para favorecer el estudio de velocidades. Fuente: QDMR, 2007

En cuanto al efecto de la señalización en la circulación, Pochowski (2017) presenta un caso de glorieta multicarril en servicio en EE.UU. que al tener un exceso de capacidad fue convertida en una de carril único modificando la señalización horizontal.

Se concluyó que la reducción del número de puntos de conflicto fue un factor importante en el descenso de la siniestralidad. Shea (2017) en un caso similar destaca el bajo coste que supone una medida de estas características frente al gran beneficio obtenido en la seguridad.

McCulloch (2011) expone un caso en el que mediante la modificación de la señalización horizontal y aprovechando la plataforma existente se consigue mejorar significativamente la canalización de los flujos, el guiado de los vehículos y en general las características de la circulación. En la Fig.6 se representa en color blanco la glorieta en su estado original y en color magenta la modificación realizada, que consistió principalmente en el aumento del número de carriles en las entradas, manteniendo su continuidad por el anillo y por las salidas, y la modificación de la anchura de los carriles y de la geometría de las isletas.



Figura 6. Mejora de la funcionalidad mediante nueva señalización horizontal aprovechando el espacio existente. Fuente: McCulloch, 2011

En EE.UU. Hu et al. (2011) determinan que, conforme a las observaciones de campo, el 70% de los accidentes se producen en las entradas, por lo que proponen una serie de medidas para reducir la velocidad en las aproximaciones y mejorar la percepción de los carriles y de la calzada giratoria. Estas consisten en la mejora de la señalización horizontal con marcas viales de selección de carriles, el refuerzo de la señalización vertical y la implantación de reductores de velocidad y bandas transversales de alerta (Fig. 7).

También mediante actuaciones menores se puede modificar una tipología convencional de glorieta para convertirla en otra más singular y novedosa con efectos positivos sobre la circulación. En esta línea, en Nueva Zelanda Campbell et al. (2012) presentan dos casos de transformación de una glorieta multicarril convencional en una con tipología C-glorieta (Campbell et al. 2006). Este tipo de glorieta queda caracterizada por presentar una isleta central con geometría ovalada y gorjal y una anchura de los carriles más reducida que en el diseño original (Fig. 8). El objetivo perseguido es la moderación de las velocidades de circulación para mejorar la seguridad de los ciclistas. Los autores evaluaron el nivel de servicio y la seguridad en los dos casos



Figura 7. Mejora de la señalización para mejorar la percepción. Fuente: Hu et al., 2011



Figura 8. Modificación de la tipología hacia una C-glorieta (a) la situación original (b) el diseño modificado. Fuente: Campbell et al. 2012

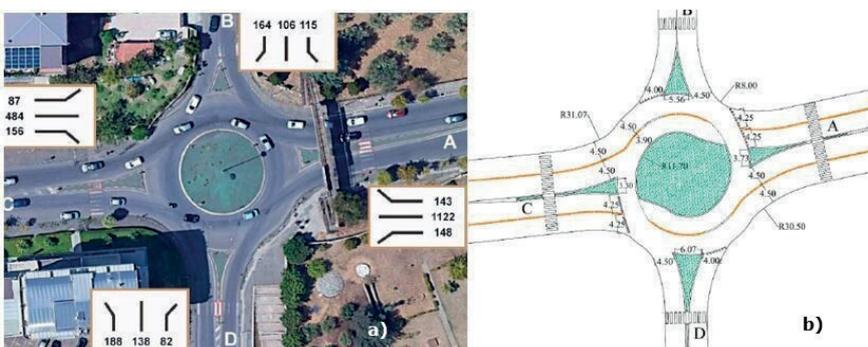


Figura 9. Modificación de la tipología hacia una turboglorieta (a) la situación original (b) el diseño modificado. Fuente: Gallelli y Vaiana, 2019

de estudio antes y después de la transformación. Los resultados manifestaron una leve disminución de la capacidad y una reducción de las velocidades máximas de paso por la glorieta de hasta 30 km/h, lo que implicó una mejora de la seguridad de todos los usuarios.

En Italia, Gallelli y Vaiana (2019) evaluaron el efecto en la circulación de la transformación de una glorieta multicarril convencional en una turboglorieta aprovechando la plataforma existente (Fig. 9). Tanto las simulaciones realizadas en la fase de estudio como las observaciones de

la circulación llevadas a cabo in situ evidenciaron mejoras considerables en la capacidad y en la seguridad.

Del análisis de los trabajos consultados se concluye que mediante modificaciones de pequeña entidad de la geometría y la señalización de una glorieta en servicio con funcionamiento deficiente se puede conseguir una mejora significativa de la capacidad y la seguridad. Para corroborar estos resultados, se presenta en el apartado siguiente la aplicación de algunas de estas medidas a dos gloriets en servicio de la red viaria española que presentan problemas en la circulación.

## 4. Casos de estudio

### 4.1. Glorieta urbana con problemas de capacidad

El primer caso de análisis es una glorieta de gran diámetro que resuelve la conexión de una vía de gran capacidad (IMD=38.232 veh/día) con el entramado urbano de un municipio (Fig. 10). La glorieta presenta cinco patas que se distribuyen de una manera no demasiado uniforme a lo largo del círculo inscrito. En el entorno de la glorieta, dotada de iluminación, se puede identificar un número importante de edificaciones y servicios.

La glorieta presenta problemas de saturación en las entradas, principalmente en las patas N y E (incluso en la imagen de satélite se pueden apreciar las colas). Mediante unas modificaciones menores se desea mejorar las características de la circulación, para cuya evaluación se requiere disponer de información detallada de la geometría y de los flujos de tráfico. La geometría de la glorieta se ha podido parametrizar a partir de una cartografía a escala 1/1.000 de la zona, y la matriz origen-destino del tráfico se ha obtenido de un aforo de 16 h de duración (entre las 6 h y las

22 h) realizado mediante cámaras de visión artificial en un día laborable de noviembre de 2018. En cuanto a los registros de accidentes no ha sido posible obtener ningún tipo de información.

De la geometría de la glorieta se han extraído los valores de los parámetros geométricos siguientes, necesarios para obtener la relación capacidad-flujo de conflicto en las entradas conforme al método de Kimber (1980):

$v$  = la mitad de la anchura de la calzada en la aproximación.

$e$  = anchura de la calzada en la entrada.

$l$  = longitud media efectiva del abocinamiento de la entrada.

$fi$  = ángulo de entrada.

$r$  = radio del borde exterior de la entrada.

$D$  = diámetro del círculo inscrito

Los valores de estos parámetros para las diferentes entradas se muestran en la Tabla 3.

La relación entre la capacidad  $Q_e$  y el flujo de conflicto  $Q_c$  resultante en cada entrada es la siguiente:

$$SE: Q_e = 2.033 - 0,60 \times Q_c$$

$$E: Q_e = 1.555 - 0,51 \times Q_c$$

$$N: Q_e = 1.226 - 0,45 \times Q_c$$

$$NO: Q_e = 1.524 - 0,53 \times Q_c$$

$$SO: Q_e = 1.403 - 0,50 \times Q_c$$

En cuanto al tráfico sólo se dispone de los volúmenes totales medidos durante el período de 16 horas. Por ello, las variaciones temporales se han extraído de una estación permanente situada en las proximidades, con el objetivo de estimar las intensidades horarias IH-100 de todos los movimientos. En la Tabla 4 se muestran los valores de la IH-100 de los movimientos en unidades de vehícu-

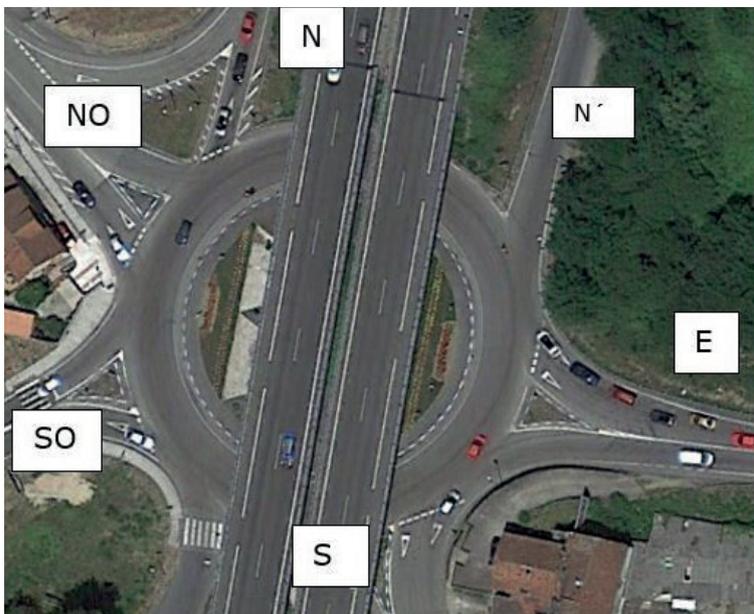


Figura 10. Caso de estudio: glorieta multicarril con problemas de capacidad. Fuente: Google Earth

Tabla 3. Parámetros geométricos utilizados en el cálculo de capacidad en la situación actual

Entrada	$v$ (m)	$e$ (m)	$l$ (m)	$fi$ (g)	$r$ (m)	$D$ (m)
SE	6,43	6,93	0,00	21,0	18,9	64,0
E	4,08	7,29	5,70	36,0	17,7	64,0
N	4,15	4,15	0,00	31,0	12,0	64,0
NO	3,78	6,80	3,75	15,0	32,0	64,0
SO	3,78	4,86	4,56	19,0	20,0	64,0

los equivalentes por hora (veh-eq/h). Para su cálculo se ha considerado, conforme a los resultados del aforo, un porcentaje de pesados del 6,5% en todos los movimientos.

Con la información anterior se han calculado los grados de saturación y los niveles de servicio en las entradas (Tabla 5). El significado de las variables que aparecen en la tabla es el siguiente:

- $le$ : intensidad en la entrada
- $ls$ : intensidad en la salida
- $Q_e$ : capacidad en la entrada
- $Q_c$ : flujo de conflicto en la entrada
- $S$ : grado de saturación

Los resultados muestran que dos de las entradas presentan un grado de saturación elevado, igual o supe-

rior a 0,85. Esta situación se ha podido comprobar también en las observaciones de campo. Por otro lado, se ha comprobado también que el diseño actual permite el paso de los vehículos más largos que es probable que circulen por la glorieta.

Con el objetivo de mejorar el funcionamiento de la circulación se ha planteado una propuesta de mejora. Aunque dada la configuración y el número de accesos lo ideal en casos como este sería la sustitución de la glorieta actual por dos glorietas de menores dimensiones (si las colas que se forman en la vía que conecta las glorietas no bloquean las mismas), en este caso particular se ha descartado esta solución debido al impacto que se generaría en el entorno urbano. La actuación propuesta consiste en unas modificaciones menores del diseño con el principal

Tabla 4. Matriz origen – destino de intensidades IH-100 (veh-eq/h).

	<b>SE</b>	<b>E</b>	<b>N</b>	<b>NO</b>	<b>SO</b>	
<b>SE</b>	46	170	16	149	326	706
<b>E</b>	74	0	562	282	152	1.070
<b>N</b>	120	169	26	59	302	676
<b>NO</b>	70	154	198	0	66	487
<b>SO</b>	232	273	192	0	0	696
	542	765	993	490	846	<b>3.636</b>

Tabla 5. Grado de saturación y nivel de servicio de las entradas en la situación actual

	<b>le</b> (veh-eq/h)	<b>Is</b> (veh-eq/h)	<b>Qe</b> (veh-eq/h)	<b>Qc</b> (veh-eq/h)	<b>S = le / Qe</b>	<b>NS</b>	
<b>SE</b>	707	542	1.424	1.012	0,50	A	Adecuado
<b>E</b>	1.070	766	1.072	953	1,00	F	Congestión
<b>N</b>	676	994	795	1.029	0,85	E	Saturado
<b>NO</b>	488	490	883	1.215	0,55	C	Adecuado
<b>SO</b>	697	846	976	857	0,71	B	Adecuado

Tabla 6. Parámetros geométricos utilizados en el cálculo de capacidad en la glorieta modificada

Entrada	<b>v (m)</b>	<b>e (m)</b>	<b>l (m)</b>	<b>fi (g)</b>	<b>r (m)</b>	<b>D (m)</b>
<b>SE</b>	6,43	8,00	17,00	30,0	30,0	57,0
<b>E</b>	4,08	7,50	10,00	25,0	25,0	57,0
<b>N</b>	4,15	6,00	6,00	36,0	25,0	57,0
<b>NO</b>	3,78	4,50	4,00	27,0	17,5	57,0
<b>SO</b>	3,78	4,60	6,00	30,0	17,5	57,0

Tabla 7. Grado de saturación y nivel de servicio de las entradas en la glorieta modificada

	<b>Qe</b> (veh/h)	<b>Qc</b> (veh/h)	<b>isat = le / Qe</b>	<b>NS</b>	<b>NS acceso</b>	
<b>SE</b>	1.510	1.012	0,35	A	A	Adecuado
<b>SE (By-pass)</b>	561	1.012	0,31	A		Adecuado
<b>E</b>	927	953	0,55	C	B	Adecuado
<b>E (Bypass)</b>	923	432	0,61	A		Adecuado
<b>N</b>	1.073	1.029	0,63	C	C	Saturado
<b>NO</b>	822	1.215	0,6	B	B	Adecuado
<b>SO</b>	972	857	0,71	C	C	Adecuado

objetivo de mejorar las características de la circulación en las entradas más saturadas, las patas E y N. Se ha buscado modificar los parámetros con mayor influencia en la capacidad: la anchura de la entrada y la longitud media del abocinamiento. Además, se ha intentado facilitar la circulación en el resto de los accesos mediante una mejora de la canalización de los movimientos, lo cual a su

vez redundará en un incremento de la seguridad.

La actuación propuesta se refleja en la Figura 11 y se ha apoyado principalmente en las guías y normas de diseño y señalización MF(2012), MF(2014) y MF(2016). Dadas las limitaciones de espacio, las modificaciones han consistido fundamentalmente en la reducción de la anchura de la calzada anular y del diámetro

exterior, y en el aprovechamiento de algún espacio adicional en las zonas sin servicios ni edificaciones (espacio interior en las patas N y N'). En la Tabla 6 se muestran los valores de los parámetros que permiten estimar la relación capacidad-flujo de conflicto en las entradas.

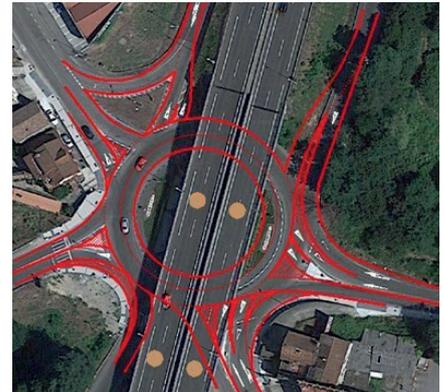


Figura 11. Geometría de la propuesta de mejora

La nueva geometría no interfiere con ningún servicio y requiere una modificación de la señalización en los accesos, principalmente en aquellos que se han dotado de carriles segregados. Como se observa en la Figura 12 el diseño es compatible con el paso de un vehículo articulado y, en la calzada giratoria, de manera simultánea con un turismo.

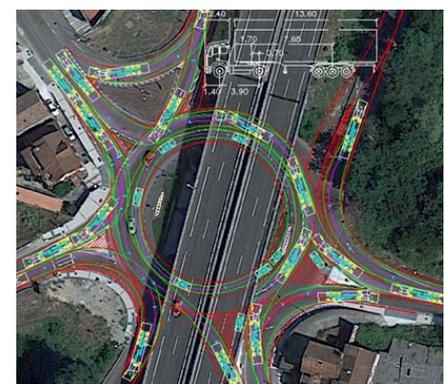


Figura 12. Caso de estudio: comprobación de áreas barridas en la propuesta

En la Tabla 7 se muestran los grados de saturación y los niveles de servicio obtenidos en las entradas con la nueva geometría. Se observa que los niveles de servicio han mejorado notablemente. Un estudio de

la evolución de la demanda de tráfico puede concluir hasta qué año el diseño podría mantenerse con unos niveles de servicio adecuados.

## 4.2. Glorieta periurbana con problemas de elevadas velocidades

El segundo caso de estudio es una glorieta periurbana de tres patas, dotada de iluminación, que resuelve la intersección entre una vía principal de doble calzada (carretera multicarril) y una secundaria de calzada única con disposición perpendicular a la anterior (Fig. 13).

La intensidad de tráfico en la vía principal es elevada, habiéndose registrado en una estación de aforo próxima una IMD de 26.663 veh/día en el año 2018. La velocidad media de circulación en la vía principal, obtenida también de aforos oficiales, es de 79 km/h, y la velocidad máxima señalizada de 80 km/h. Hay que añadir que a unos 300m al sur de la glorieta se localiza un radar fijo de control de la velocidad en la calzada con sentido norte. Además, en las aproximaciones a la glorieta por la vía principal hay dispuestas unas bandas transversales de alerta (tipo resaltadas).



Figura 13. Caso de estudio: glorieta multicarril con problemas de elevadas velocidades. Fuente: Google Earth

Las deficiencias identificadas en esta glorieta que pueden afectar a la calidad de la circulación se resumen a continuación:

- Las trayectorias de los vehículos a su paso por la glorieta pueden ser casi rectilíneas (líneas rojas en la Figura 13), pues el diseño no induce la presencia de inflexiones en las mismas. Por lo tanto, no existe deflexión en el perfil de velocidades de los movimientos de paso por la vía principal y las velocidades practicadas en las entradas a la glorieta son elevadas. Seguramente por este motivo se ha dispuesto en las proximidades un radar fijo, pues una velocidad elevada en la aproximación a la glorieta incrementa el riesgo de accidente, tanto por pérdida de control del vehículo como por colisión con otros vehículos que circulan por la calzada anular durante la propia maniobra de entrada.
- El diseño no contempla un adecuado equilibrio en el número de carriles, pues las entradas son de uno o dos carriles y la calzada anular presenta tres.
- La canalización de los movimientos puede no resultar clara para el conductor. De hecho, observando las rodadas, parece que los movimientos de entrada a la calzada anular desde los carriles exteriores de la vía principal no pueden realizarse, sin un movimiento forzado, hacia el carril exterior de la calzada giratoria, que sería el movimiento natural, lo cual puede ser fuente de conflictos. El origen de esta problemática suele radicar en la adopción de un valor reducido del radio exterior de entrada.
- Observando las rodadas de los vehículos se pueden apreciar amplias zonas de la glorieta que no son necesarias, lo cual determina

que las dimensiones de algunos elementos podrían reducirse, lo que incrementaría la seguridad de la glorieta.

Las medidas que se han propuesto para mejorar las características de la circulación han consistido en la modificación de la geometría de las patas de aproximación a la glorieta por la vía de doble calzada para conseguir una moderación de las velocidades de aproximación, y de las dimensiones de la calzada anular y de los accesos para mejorar la canalización de los flujos, alcanzar un mejor equilibrio de carriles y un mayor control de las velocidades de entrada a la glorieta. El diseño propuesto considera además modificaciones en el número de carriles de la calzada anular. Conforme a los criterios establecidos en la Guía de Nudos (MF 2012), se recomienda que, en el caso de glorietas multicarril, cuando hay una salida de un único carril, se reduzca la anchura de la calzada anular a un carril antes de llegar a ella. Esta configuración requiere un cuidado especial en el diseño de la señalización con el objetivo de orientar adecuadamente a los conductores en la selección del carril más adecuado a la maniobra prevista en la aproximación a la glorieta.

En la Figura 14 se muestra la geometría resultante tras las modificaciones anteriores (en color rojo) junto a las trayectorias más rápidas de los movimientos de paso por la vía principal (en verde), que han sido determinadas siguiendo la metodología recogida en Rubio et. al (2019) y en Rubio (2017).

Se puede percibir que la modificación de la geometría induce la aparición de un mayor curvado en las trayectorias más rápidas y por lo tanto un descenso de las velocidades a lo largo de ellas, lo cual favorece la consistencia y, en definitiva, la seguridad viaria. Se busca una reducción

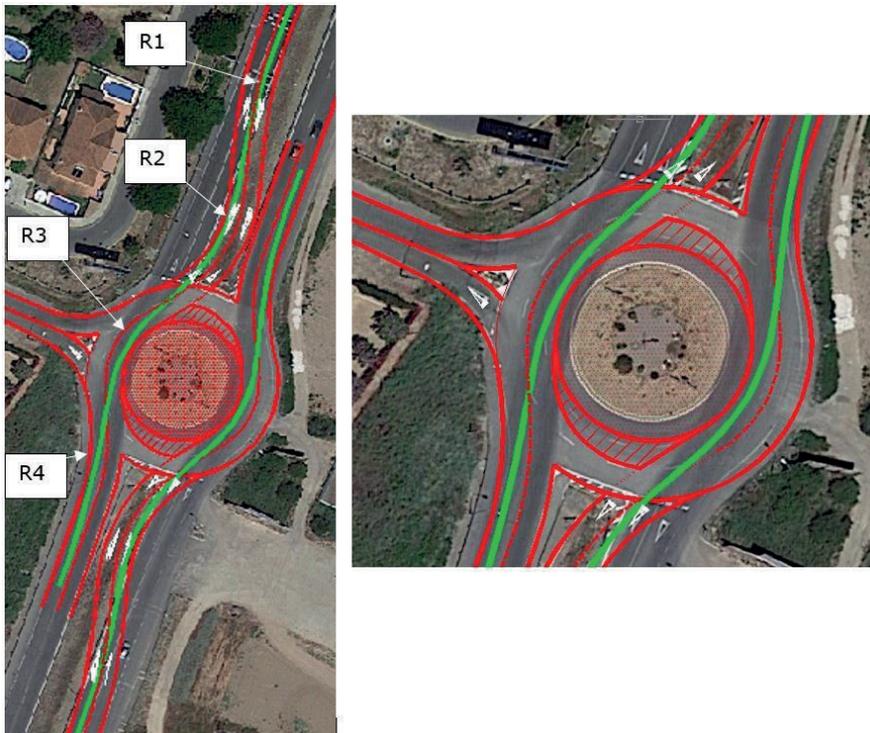


Figura 14. Caso de estudio: Geometría con las modificaciones propuestas junto a las trayectorias más rápidas



Figura 15. Modelo 3D de la solución propuesta (a) Vista desde el acceso sur (b) Vista desde el acceso norte

gradual de la velocidad en la aproximación y en la entrada a la calzada anular, desde la cual posteriormente se inicia la maniobra de aceleración hacia la salida.

Los resultados obtenidos se consideran satisfactorios conforme a los criterios establecidos en la Guía de Nudos (MF 2012). Se muestran a continuación algunos detalles de los mismos:

- El primer radio de la trayectoria (R1) tiene un valor del orden de 140m, luego se puede asumir una V85 de aproximadamente 55 km/h.
- El segundo radio de la trayectoria (R2) tiene un valor del orden de 55m, luego se puede asumir una V85 de 35 km/h.
- El tercer radio (R3), en la calzada anular, tiene un valor del orden de

35m, luego se puede asumir una V85 de 30 km/h.

- El radio de salida (R4) tiene un valor del orden de 180m, y las velocidades dependen de la capacidad de aceleración de los vehículos.

Por último, para valorar la integración de la mejora propuesta y la nueva señalización en el conjunto de la vía se ha desarrollado un modelo en tres dimensiones con herramientas utilizadas habitualmente en la metodología BIM. En la Figura 15 se muestran los resultados de la implantación.

## 5. Conclusiones

De lo expuesto en este artículo, puede concluirse que resulta posible conseguir mejoras significativas en la circulación, tanto desde el punto de vista de los niveles de servicio como de la seguridad, en glorietas en servicio con deficiencias en su funcionamiento mediante correcciones menores de bajo coste del trazado y de la señalización con un reducido impacto en el entorno.

## 6. Bibliografía

- [1] AKÇELIK, R. (2004). Roundabouts with unbalanced flow patterns. Paper presented at the ITE 2004 Annual Meeting, Lake Buena Vista, Florida, USA.
- [2] AKÇELIK R. (2008). The Relationship between Capacity and Driver Behaviour. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Kansas City, MO, EEUU.
- [3] AUSTRROADS. (2011). Roundabouts. Guide to Road Design. Part 4B. Association of Australian State Road and Transport Authorities. Sydney, Australia.

- [4] BILL, A. (2017). Statewide Roundabout Safety Analysis. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Green Bay, Wisconsin, EEUU.
- [5] BRILON, W. y WU, N. (2008). Kapazitaet von Kreisverkehren Aktualisierung. (Capacity of roundabouts). Strassenverkehrstechnik, Nr. 5, S. 280 – 288.
- [6] CAMPBELL, D., JURISICH, I. y DUNN, R. (2006). Improved multi-lane roundabout designs for cyclists. Land Transport NZ research report 287. 140pp.
- [7] CAMPBELL, D., ASMUS, D., JURISICH, I. y DUNN, R. (2012). Evaluation of the C-roundabout – an improved multi-lane roundabout design for cyclists. NZ Transport Agency research report 510. 138pp.
- [8] CHLEWICKI, G. (2017). Comparing Ramp Terminal Roundabouts with Diverging Diamond Interchanges. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Green Bay, Wisconsin, EEUU.
- [9] GALLELLI, V. y VAIANA, R. (2019). Safety Improvements by Converting a Standard Roundabout with Unbalanced Flow Distribution into an Egg Turbo Roundabout: Simulation Approach to a Case Study. Sustainability, 11(2):466.
- [10] HAWKINS (2011). Signing and Marking of Roundabouts. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Carmel, Indiana, EEUU.
- [11] Hu, W., Mc Cartt, A. y Mandavilli, S. (2011). Study of Crash Patterns and Related Factors at Kansas and Washington Roundabouts. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Carmel, Indiana, EEUU.
- [12] JOHNSON, M. (2017). Design principles for safety and operations of multi-lane roundabouts. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Green Bay, Wisconsin, EEUU.
- [13] KIMBER, R. (1980). The traffic capacity of Roundabouts. Report LR 942. TRL Laboratory. Crowthorne, London. England.
- [14] KUHLOW, K. (2011). Roundabout Geometric Design. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Carmel, Indiana, EEUU.
- [15] MAYCOCK, G. y HALL, R. (1984). Accidents at 4-arm roundabouts. Report LR 1120. TRL Laboratory. Crowthorne, London. England.
- [16] McCULLOCH, H. (2011). Entry Path Overlap – What is it and how to Fix it. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Carmel, Indiana, EEUU.
- [17] MINISTERIO DE FOMENTO (MF) (2012). Guía de Nudos Viarios. Dirección General de Carreteras, Madrid, España.
- [18] MINISTERIO DE FOMENTO (MF) (2014). Norma 8.1.I.C. Dirección General de Carreteras, Madrid, España.
- [19] MINISTERIO DE FOMENTO (MF) (2016). Norma 3.1.I.C. Dirección General de Carreteras, Madrid, España.
- [20] NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP). (2010). Roundabouts: An information guide 2nd edition. Rep. No. 672, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC. EEUU.
- [21] POCHOWSKI, A. (2017). NCHRP Synthesis Report 488: Roundabout Practices. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Green Bay, Wisconsin, EEUU.
- [22] PRICE, P. y RUST, P. (2011). Preventing path overlap by design: Evaluating two differing techniques. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Carmel, Indiana, EEUU.
- [23] QUEENSLAND DEPARTMENT OF MAIN ROADS (QDMR) (2007). Roundabouts. Chapter 14 of the Road Planning and Design Manual. Brisbane, Australia.
- [24] RUBIO-MARTÍN, J.L, JURADO-PIÑA, R. Y PARDILLO-MAYORA, J.M. (2014). A heuristic procedure for the optimization of speed consistency in the geometric design of single-lane roundabouts. Canadian Journal of Civil Engineering, 42:13-21.
- [25] RUBIO-MARTÍN, J.L (2017). Tesis Doctoral “Optimización del diseño geométrico de glorietas mediante algoritmos genéticos”. E.T.S de ICCP, Universidad Politécnica de Madrid.
- [26] RUBIO-MARTÍN, J.L, JURADO-PIÑA, R. Y PARDILLO-MAYORA, J.M. (2019). Automated Identification of Fastest Vehicle Paths at Roundabouts. Journal of Transportation Engineering (ASCE), Part A: Systems. Vol 145 Issue 9.
- [27] SHEA, B. (2017): Reed Market/15th Street Roundabout Project. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Green Bay, Wisconsin, EEUU.
- [28] VORISEK, J. (2011): Entrance modifications to Reduce Speeds at Existing Roundabouts. Paper presented at the TRB National Roundabout Conference, Carmel, Indiana, EEUU. ❖