

ALGORITMO PARA LA ESTIMACIÓN DE TRAYECTORIAS EN GLORIETA

Juan Luis Rubio Martín
Ingeniero de Caminos (doctorando UPM)

Rafael Jurado Piña
Profesor Titular de Universidad (UPM)

José M^a Pardillo Mayora
Profesor Titular de Universidad (UPM)

RESUMEN

Las glorietas se han convertido en los últimos años en un tipo de intersección muy popular. Un apartado esencial del diseño de glorietas es la seguridad de circulación, aspecto muy relacionado con la distribución de velocidades. La geometría debe limitar las diferentes posibilidades de trayectoria de tal forma que los conductores moderen su velocidad y exista una adecuada consistencia de velocidades.

Las guías de diseño tradicionalmente han propuesto una serie de indicadores geométricos (radio de entrada de la trayectoria, radio de la deflexión y ángulo ϕ , entre los principales) suponiendo que unos valores adecuados para estos indicadores favorecen el control de la velocidad y la seguridad en la intersección. Un enfoque más moderno, se basa en modelar las trayectorias de los vehículos y analizar el perfil de velocidades. En cualquier caso, siguiendo los indicadores denominados tradicionales o los enfoques más modernos, se requiere establecer las trayectorias con mayor o menor detalle. Esto define una tarea compleja, laboriosa y no exenta de cierta subjetividad. Para su definición no existe consenso internacional en cuanto a la metodología a emplear.

En la presente investigación se propone una nueva metodología para abordar el cálculo de trayectorias. El modelo se centra en glorietas de un carril con cualquier configuración en las alineaciones de acceso. El dato básico es la geometría de la glorieta. A partir de ella, y en base a la definición de una serie de retranqueos respecto de los bordes de calzada, se han desarrollado una serie de construcciones geométricas que permiten establecer de forma automática las trayectorias aproximadas de los vehículos más rápidos.

1. INTRODUCCIÓN

Las glorietas se han convertido en los últimos años en un tipo de intersección muy popular. En numerosos países, entre ellos España, las glorietas se han instalado con mucha profusión y se han aplicado en muy distintos tipos de situaciones.

El funcionamiento de una rotonda es bien conocido: los vehículos que pretenden entrar en la intersección ceden el paso, y una vez situados en la calzada anular giran alrededor de una isleta central (el sentido depende de cada país o Administración) hasta alcanzar su destino.

El diseño en planta de una glorieta es llevado a cabo en la práctica de una manera iterativa, modificando las características de los diferentes elementos geométricos que componen la glorieta, hasta alcanzar una solución final que satisfaga una serie de requisitos técnicos y funcionales. Estos requisitos son fundamentalmente tres: i) el diseño final debe permitir el paso y giro no forzado del vehículo más grande que tiene una probabilidad razonable de utilizar la glorieta ii) el diseño debe garantizar que el tráfico opere con un adecuado nivel de servicio en la hora punta, además de acomodar de forma adecuada al resto de usuarios (ciclistas y peatones) and iii) la geometría en planta de la glorieta debe favorecer la moderación de las velocidades en las aproximaciones y garantizar la consistencia de velocidades.

Los dos primeros requisitos son generalmente objeto de un estudio preliminar, mediante el cual se identifica tanto el número de carriles que deben disponerse en la calzada anular y en las entradas, como el diámetro mínimo de la glorieta. El tercer requisito requiere de un estudio de las trayectorias y velocidades de los vehículos a su paso por la glorieta.

En el presente artículo se ha desarrollado un algoritmo que permite construir de forma automática, en base a la geometría de la glorieta, todas las trayectorias de los vehículos más rápidos. Esto posibilita al proyectista obtener los perfiles de velocidad y comprobar la bondad del diseño geométrico en cuanto al estudio de velocidades. El procedimiento se ha centrado en glorietas de un carril con cualquier configuración en las patas de acceso.

2. ESTUDIO DE TRAYECTORIAS Y VELOCIDADES EN GLORIETAS

El estudio de velocidades y su consistencia es reconocido como uno de los apartados fundamentales del diseño de glorietas, pues una adecuado control de las velocidades de circulación en la glorieta influye de manera relevante en la seguridad de la misma (Rodegerdts et al., 2007; Rodegerdts et al., 2010).

Para abordar este estudio, las guías de diseño de glorietas de diferentes países han propuesto en el pasado distintos indicadores geométricos, suponiendo que unos valores adecuados para estos indicadores favorecen el control de la velocidad y la seguridad en la intersección. Los principales indicadores especificados en las Normas han sido: radio de la trayectoria de

entrada, radio de la deflexión y ángulo de desviación (Montella et al., 2012).

El radio de la trayectoria de entrada es una medida de la deflexión impuesta en la entrada, y su influencia en la seguridad de la glorieta ha sido contrastada en diferentes estudios (Maycock y Hall, 1984; Arndt, 1998). Es un indicador empleado en la normativa británica y española (Highway Agency, 2007; MOPU, 1989). El radio de la deflexión se refiere al arco que define la trayectoria más rápida alrededor de la isleta central, y es utilizado por las normativas francesa y australiana (SETRA, 1998; QDMR, 2006).

Para determinar estos dos indicadores se debe dibujar la trayectoria más rápida permitida por la geometría. Para dibujar esta trayectoria hay que tener en cuenta unas distancias mínimas (retranqueos) respecto de los bordes de calzada, cuyos valores vienen especificados en las Normas. Con estos datos, las guías recomiendan que el proyectista encaje una serie de círculos tangentes que representen la trayectoria del vehículo, ayudándose de plantillas o con herramientas de CAD, y en todo caso, aplicando su buen juicio.

Por último, el ángulo de desviación define el ángulo impuesto por la isleta central entre dos accesos opuestos, y se recomienda sea superior a 45° (VSS, 1999; MIT, 2007). Es un indicador que depende estrictamente de la geometría. Spacek (2004) en un estudio experimental mostró una correlación entre ángulos pequeños y alta accidentalidad.

Un enfoque más moderno se basa en modelar las trayectorias de los vehículos y analizar el perfil de velocidades, tal y como se recoge en Rodegerdts et al. (2010), normativa americana. En este documento se propone que las trayectorias de los vehículos más rápidos deben dibujarse para todas las aproximaciones y para todos los movimientos. Posteriormente se tienen que comprobar los valores de los cinco radios representados en la Fig.1. Para definir el trazado de las trayectorias se imponen de igual forma una serie de retranqueos, aunque no especifica ninguna metodología para su cálculo. Bastos y Maia (2006) han adoptado una metodología muy similar para el caso portugués.

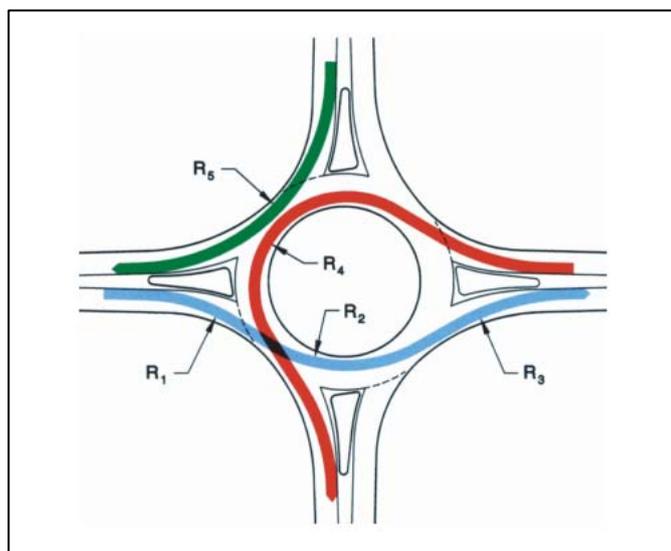


Fig. 1- Trayectorias y radios críticos en una glorieta de un carril (Rodegerdts et al., 2010)

Un intento de facilitar la tarea del proyectista mediante herramientas de CAD se puede encontrar en la guía de Wisconsin (WisDOT, 2008), si bien el procedimiento propuesto no permite la construcción automática de las trayectorias a partir de la geometría de la glorieta. Más recientemente Ada County Highway District (ACHD, 2011) ha desarrollado un procedimiento que permite definir las trayectorias en glorietas con uno y dos carriles en los accesos. Mediante una serie de construcciones geométricas es posible definir los cinco radios críticos representados en la Fig.1. Presenta la ventaja de ser un procedimiento que puede automatizarse, a diferencia del anterior. Sin embargo, los retranqueos que utiliza son variables (derivados del mismo procedimiento constructivo) y, de forma lógica, siempre resultan superiores a los mínimos. Con esta forma de cálculo no se aprovecha de forma completa la geometría para definir la trayectoria más rápida posible. Además, no se ha resuelto el caso de accesos situados en Y.

Un enfoque intermedio en el estudio de velocidades, con el uso de indicadores geométricos y estudio de perfiles de velocidad y consistencia, es el adoptado en la normativa australiana (QDMR 2006). Las especificaciones de esta guía se basan en los trabajos de Arndt (1998) y resulta necesaria la definición de las trayectorias en cada uno de los accesos.

Para esto propone una metodología, integrada en un software denominado ARNDT. Aunque se obtienen trazados razonables, la trayectoria se aleja del retranqueo mínimo propuesto para la isleta central. El principal inconveniente es que no considera la trayectoria entre un acceso con salida en el acceso consecutivo, por lo que no resulta válida para el estudio de todas las velocidades, y en consecuencia, la consistencia de la intersección.

En el documento publicado por AUSTRROADS recientemente (AUSTRROADS, 2011) se han adoptado idénticos criterios.

En conclusión, siguiendo los indicadores denominados tradicionales o los enfoques más modernos, se requiere establecer las trayectorias de los vehículos más rápidos con mayor o menor detalle. Esto define una tarea compleja, laboriosa y no exenta de cierta subjetividad. A pesar de los diferentes intentos incluidos en algunas Normas, no existe ninguna metodología que permita construir todas las trayectorias a partir de la geometría de la glorieta.

3. ALGORITMO PARA LA ESTIMACIÓN DE TRAYECTORIAS EN GLORIETAS

3. 1 Datos e hipótesis de partida

El estudio se ha centrado en glorietas de un carril sin limitaciones en cuanto al número de accesos y su posición.

El dato básico es la geometría de la glorieta, y queda definida mediante los siguientes

parámetros:

- Diámetro del círculo inscrito y su posición.
- Anchos de calzada.
- Trazado de las isletas deflectoras. Para el caso de glorietas de un carril, el diseño mediante un radio único con tangencia al diámetro del círculo inscrito (borde exterior) y a la isleta central (borde interior), se considera típicamente adecuado (Rodegerdts et al. 2010).

De acuerdo a las recomendaciones de la normativa internacional, el vehículo que realiza la trayectoria tiene un ancho de dos metros, el cual debe mantener los siguientes retranqueos:

1,0m respecto del eje de la calzada en los accesos y el borde interior de la isleta deflectora.
1,5m respecto del borde exterior de la isleta deflectora y el diámetro de la isleta central.

Para garantizar que las trayectorias generadas cumplan con los condicionantes anteriores, se han definido una serie de círculos y rectas auxiliares, representados en la Fig.2. Para mayor claridad sólo se muestran las construcciones auxiliares para una entrada y una salida.

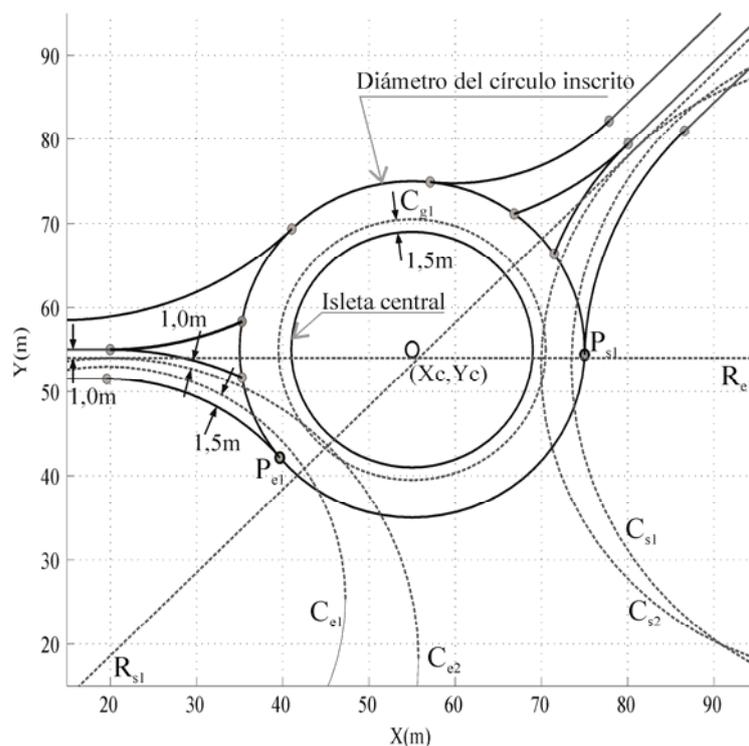


Fig. 2- Círculos y rectas auxiliares utilizados en el cálculo de trayectorias

3.2 Definición del tipo de movimiento

Se asume que entre una entrada y una salida sólo pueden definirse dos tipos de movimiento:

1. Trayectoria con deflexión. En este movimiento la presencia de la isleta central provoca una curvatura en la trayectoria del vehículo a su paso por la glorietta.

2. Trayectoria directa. El movimiento se realiza sin oposición de la isleta central.

Para delimitar el tipo de movimiento se construye una recta R_t que une el punto medio en la entrada y el punto medio en la salida, tal y como se muestra en la Fig. 3. Si la recta interseca con el retranqueo de la isleta central C_{gl} el movimiento define una trayectoria con deflexión, en caso contrario, una trayectoria directa.

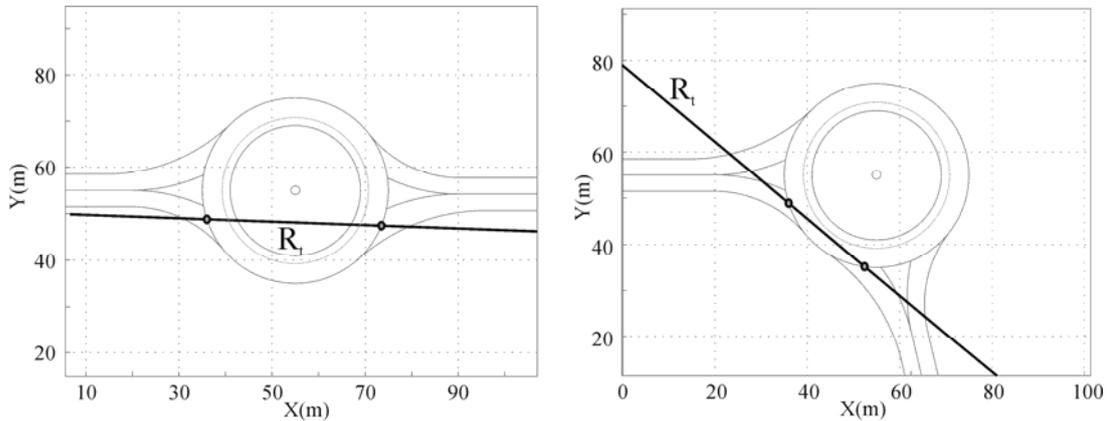


Fig. 3- Tipos de movimientos considerados: trayectoria con deflexión (a la izquierda) y trayectoria directa (a la derecha)

3.3 Construcción de la trayectoria directa

Para definir el radio de entrada de la trayectoria se realiza la siguiente construcción: círculo tangente a las rectas R_{eI} y R_t , conociendo el punto de tangencia T_{eI} en la recta R_t .

Todos los datos necesarios para realizar la tangencia son fijos, a excepción del punto de tangencia en la recta. Su posición depende de la configuración de la entrada y la salida, y de la geometría. Inicialmente T_{eI} se sitúa perpendicular al punto de tangencia P_{eI} .

De forma análoga se procede en el caso de las salidas con las rectas R_{sI} y R_t , y el punto de tangencia T_{sI} . En la Figura 4 se ha representado la construcción completa de la trayectoria según el procedimiento descrito.

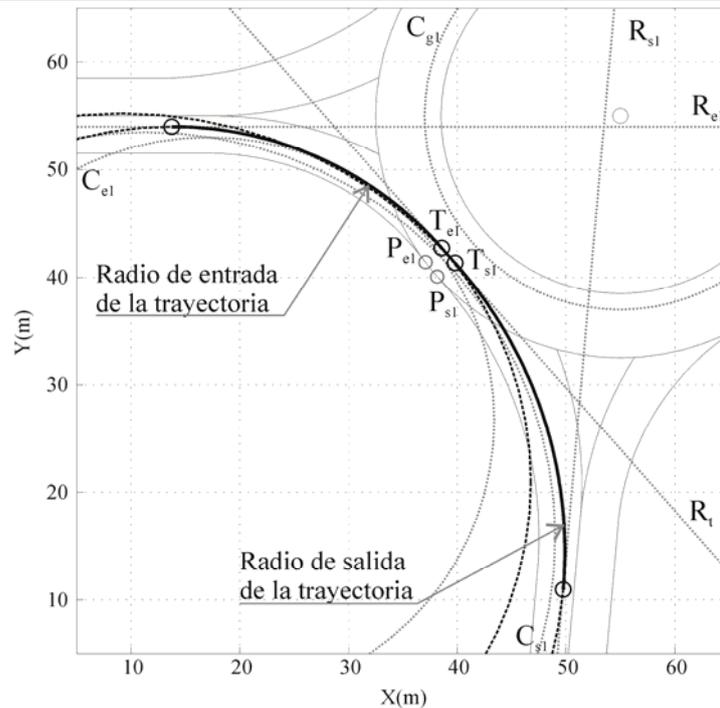


Fig. 4- Construcción de la Trayectoria directa

Sucede que, conforme se separan los accesos o se modifica la geometría, los radios calculados pueden ocupar los retranqueos (C_{el}, C_{sl}). En estos casos hay que corregir el procedimiento definiendo una nueva posición para los puntos de tangencia T_{el} y T_{sl} . En el caso del radio de entrada de la trayectoria se siguen los siguientes pasos (Fig. 5):

- Bisectriz R_b de las rectas R_{el} y R_t .
- Intersección de esta recta con el círculo C_{gl} . El punto definido es un nuevo punto de paso y permite obtener de forma inmediata el punto de tangencia T_{el} buscado (nótese que T_{el} ha desplazado su posición en dirección hacia la entrada).

Con el radio de salida de la trayectoria se procedería de forma análoga.

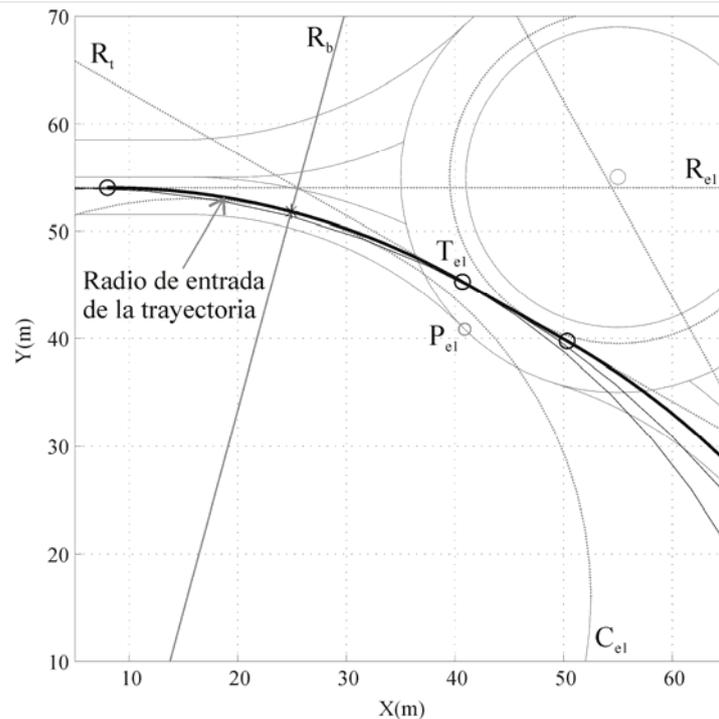


Fig. 5- Corrección para el cálculo de la trayectoria directa (en la entrada)

Así pues, el resultado final es una trayectoria compuesta por un radio de entrada, una recta cuya longitud es variable (cero en accesos muy próximos) y un radio de salida.

3.4 Construcción de la trayectoria con deflexión

Siguiendo el caso presentado en el epígrafe anterior, si se separan los accesos ó se modifica la geometría, la recta R_t puede intersectar con el retranqueo C_{gl} . A partir de este momento la trayectoria es considerada con deflexión.

La construcción que se propone para el radio de entrada de la trayectoria: círculo tangente a la recta R_{el} , al círculo C_{el} y a un nuevo círculo denominado C_d . Este círculo se corresponde con el radio de la deflexión recogido en la normativa. Para el radio de salida de la trayectoria se procede de forma análoga. El procedimiento se muestra en la Fig.6.

Todos los datos necesarios para realizar la tangencia son fijos, a excepción del círculo C_d . Su definición depende de si existe la intersección de este círculo con los retranqueos (C_{el}, C_{sl}).

En primera instancia, y en la transición entre el movimiento directo y el deflectado, la intersección no existe y C_d se define mediante tres puntos:

- Punto medio en la entrada (utilizado para definir R_t).
- Punto medio en la salida (utilizado para definir R_t).
- Para calcular el tercer punto se traza la bisectriz que forman las rectas de unión de los dos puntos anteriores con el centro de la glorieta. Esta recta intersecta con el retranqueo C_{gl} en el punto buscado.

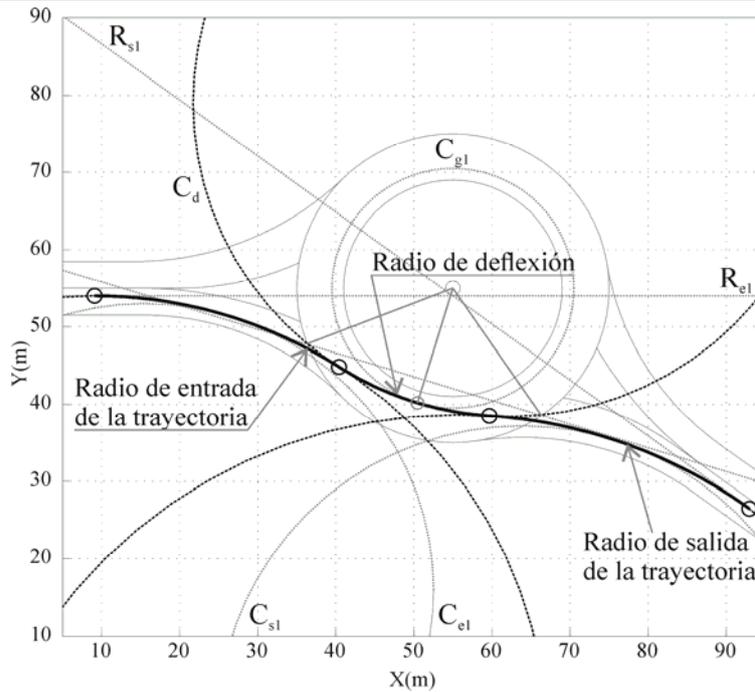


Fig.6- Construcción de la trayectoria con deflexión

Si seguimos aumentando la separación de los accesos o modificamos la geometría, puede producirse la intersección de C_d con C_{el} o C_{sl} . En estos casos hay que corregir el procedimiento definiendo de nuevo el círculo C_d , tal y como se muestra en la Fig. 7. Para ello se definen tres nuevos puntos:

- Punto medio de la calzada anular en la recta de unión entre P_{el} y el centro de la glorieta.
- Punto medio de la calzada anular en la recta de unión entre P_{sl} y el centro de la glorieta.
- Bisectriz de las dos rectas definidas anteriormente e intersección con el retranqueo C_{gl} .

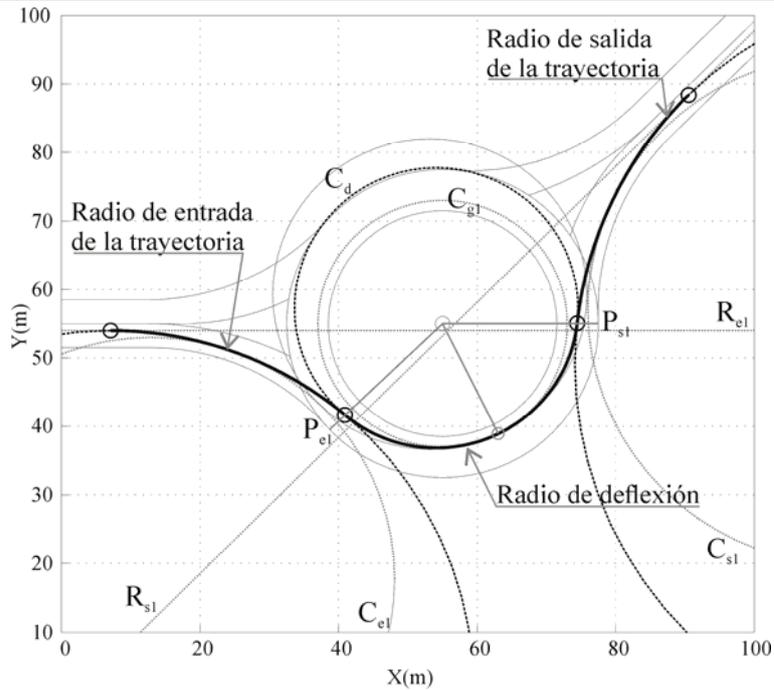


Fig.7- Corrección para el cálculo de la trayectoria con deflexión

Así pues, el resultado final es una trayectoria compuesta por un radio de entrada, un radio de paso por el anillo (radio de la deflexión) y un radio de salida.

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha descrito un procedimiento que permite obtener todas las trayectorias de paso por glorietas de un carril, cualquiera que sea la configuración de los accesos.

El algoritmo se basa en la solución de sencillos problemas de tangencia, cuyo resultado es la definición de dos tipos de movimiento entre una entrada y una salida: una trayectoria con deflexión, compuesta de tres círculos, y una trayectoria directa, compuesta de dos círculos y un tramo recto de longitud variable. El procedimiento es automatizable, y se repite para cada entrada y cada salida, obteniendo un importante ahorro de tiempo para el proyectista.

A partir de las trayectorias, es posible obtener los perfiles de velocidad. Aunque resulta imprescindible adoptar adecuadas relaciones radio-velocidad-peralte y tener en cuenta los procesos de aceleración-deceleración que tienen lugar durante el recorrido de la trayectoria. De otra forma el procedimiento presentado no tendría sentido.

5. REFERENCIAS

ADA COUNTY HIGHWAY DISTRICT (ACHD) (2011). *Roundabout Design Guide*. Policy Manual. Section 5188 Appendix A. Idaho. US.

ARNDT, O. K. Relationship Between Roundabout Geometry and Accident Rates - Final

Report. Report Number ETD02. QDMR. Australia, (1998).

ASSOCIATION OF SWISS ROAD AND TRAFFIC ENGINEERS (VSS) (1999). *Carrefours. Carrefours giratoires*. Swiss Standard SN 640 263. Zurich, Swiss.

AUSTROADS. Guide to Road Design. Part 4B: Roundabouts. Report AGRD08/11. AUSTRROADS. Australia. NSW, (2011).

BASTOS, A.M y MAIA, A.J. (2006). *Dimensionamento de Rotundas. Caracterização funcional, dimensionamento operacional e projecto geométrico*. Edição FCTUC. Coimbra.

HIGHWAYS AGENCY (HA) (2007). *Geometric Design of Roundabouts*. Design Manual of Roads and Bridges. TD 16/07. London, UK.

ITALIAN MINISTRY OF INFRASTRUCTURES AND TRANSPORTS (MIT) (2006). *Guidelines for the Design of Road Intersections*. Decree 19 April 2006. Rome, Italy.

MAYCOCK, G., y HALL, R.D. Crashes at four-arm roundabouts. Report LR 1120. TRRL. U.K., (1984).

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO (MOPU) (1989). *Recomendaciones sobre glorietas*. Textos de la Dirección General de Carreteras. Madrid, España.

MONTELLA, A., TURNER, S., CHIARADONNA, S., y ALDRIDGE, D. (2012). Proposals for Improvement of the Italian Roundabout Geometric Design Standard. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 53(0), pp. 189-202.

QUEENSLAND DEPARTMENT OF MAIN ROADS (QDMR) (2006). *Roundabouts*. Chapter 14 of the Road Planning and Design Manual. Brisbane, Australia.

SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES (SETRA) (1998). *The Design of Interurban Intersections on Major Roads: At-grade Intersections*. Bagneux Cedex. France.

RODEGERDTS, L., BANSEN, J., TIESLER, C., KNUDSEN, J., MYERS, E., JOHNSONM, M., MOULE, M., PERSAUD, B., LYON, C., HALLMARK, S., ISEBRANDS, H., CROWN, R. B., GUICHET, B., y O'BRIEN, A. Roundabouts: An Informational Guide, Second Edition. NCHRP Report 672. TRB. U.S., 2010.

RODEGERDTS, L., BLOGG, M., WEMPLE, E., MYERS, E., KYTE, M., DIXON, M., LIST, G., FLANNERY, A., TROUTBECK, R., BRILON, W., WU, N., PERSAUD, B., LYON, C., HARKEY, D., y CARTER, D. Roundabouts in the United States. NCHRP Report 572. TRB.

U.S., 2007.

SPACEK, P. (2004). Basis of the Swiss Design Standard for Roundabout. *Transportation Research Record* 1881, pp. 27-35.

WISCONSIN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (WisDOT) (2008). *Roundabout Guide*. Madison, US.