

PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS ROTATORIOS

Autor: Waldo Yanaguaya A.
ITVC – UMSA. 2016

RESUMEN

Las intersecciones constituyen elementos importantes para el sistema de circulación de un área urbana. Un tipo de intersección en particular constituyen los sistemas rotatorios o giratorios, los cuales se conforman generalmente como rotondas de gran dimensión con algún tipo de control semafórico.

En nuestro medio, no existe una normativa específica para el diseño de intersecciones urbanas, por lo que se ha propuesto investigar y proponer los principios básicos que deben regir en el diseño de intersecciones rotatorias, tomando para ello a una rotonda grande de la ciudad de El Alto, como caso de estudio.

1. INTRODUCCIÓN

Las rotondas son medios importantes para el control de tránsito en intersecciones y pueden ser efectivas en el manejo de los flujos direccionales, de acuerdo a las condiciones de espacio y volúmenes de tránsito presentes en un sitio dado.

Este tipo de intersecciones se utiliza con frecuencia en varias de las ciudades de Bolivia. Sin embargo, la geometría que encontramos en la mayoría de las rotondas no parece responder a criterios o normas técnicas de uso internacional. Por otro lado, en las ciudades de Bolivia, las rotondas no funcionan con la regla de preferencia que establece que los vehículos que se encuentran circulando dentro de la rotonda tienen prioridad de paso sobre los flujos que llegan de los brazos o aproximaciones. Esto genera un caos en los desplazamientos, llevando a que la rotonda se congestione internamente, lo que hace que se obstruya por completo la circulación cuando los flujos de más de una aproximación son elevados.

Los antecedentes expuestos sugieren que es necesario establecer los criterios principales que se deben tener en cuenta en el diseño de sistemas rotatorios en Bolivia, para que ellos operen de una forma eficiente. Es por esta razón que en el presente Proyecto de Investigación se ha propuesto desarrollar los parámetros más

importantes para el diseño de los sistemas rotatorios, haciendo uso para ello de una rotonda en la ciudad de El Alto como caso de Estudio.

2. OBJETIVOS

El objetivo del proyecto es analizar y definir los principios para el diseño de sistemas rotatorios, tomando como caso de estudio una rotonda de una ciudad de Bolivia.

Los objetivos específicos son:

- Realizar un análisis de rotondas o sistemas rotatorios en nuestro medio para seleccionar uno como caso de estudio.
- Revisar la normativa internacional para el diseño de rotondas y sistemas rotatorios semaforizados.
- Realizar un levantamiento de la geometría del sistema rotatorio.
- Realizar conteos de tráfico vehicular y peatonal en el sistema rotatorio seleccionado.
- Realizar el prediseño del sistema rotatorio siguiendo la metodología más apropiada.

A continuación, se desarrolla las tareas llevadas adelante para completar los objetivos que se han propuesto.

3. LOS SISTEMAS ROTATORIOS O GIRATORIOS

Los sistemas rotatorios o giratorios son sistemas viales que consisten de enlaces o arcos unidireccionales conectados unos a otros, de manera de hacer posible que el tráfico circule por uno o más enlaces antes de salir del sistema rotatorio. Pueden tomar una serie de formas, pero se caracterizan mayormente por ser sistemas tipo rotonda.

La instalación de semáforos en rotondas existentes se hace cada vez más común, debido a las ventajas que este tipo de intersecciones ofrecen.

Los sistemas rotatorios con control semafórico tienen muchas características en común con las intersecciones convencionales controladas por semáforos. Sin embargo, al ser sistemas “multi-nodo” en el diseño se pueden presentar complejidades adicionales, debido a las interacciones que pueden darse entre los nodos controlados por semáforos.

Efectos del control semafórico en la productividad

La introducción de semáforos en la entrada de una rotonda o sistema rotatorio puede mejorar el desempeño en¹:

- Donde haya demoras excesivas, debido a los flujos desbalanceados, los semáforos pueden alterar la prioridad para dar una mejor distribución de demoras mediante el mejoramiento del balance de colas;
- Donde el ingreso a una rotonda es inadecuado por las velocidades elevadas en la circulación interna, los semáforos pueden alcanzar una mejora general en el ingreso y paso del flujo de una aproximación;
- Donde el control por prioridad no es respetado (algo que es común en las rotondas bolivianas), generando un caos

en el sistema cuando los flujos son medios o altos; y

- Donde sea posible coordinar el sistema rotatorio, como parte de una red de control de tráfico urbano (UTC), los semáforos pueden reducir las demoras totales.

La instalación de semáforos en un sistema rotatorio, con control a tiempo completo, a menudo envuelve hacer cambios geométricos, como una parte integral para alcanzar mejoras para el flujo de paso. El alcance para los cambios en geometría con semáforos incluye:

- La provisión de carriles de entrada adicionales y mejoras en la visibilidad hacia adelante para los semáforos, mediante la reducción o remoción de la deflexión de entrada; y
- La provisión de ancho adicional de calzada, ya sea para complementar carriles de entrada en aproximaciones o para acomodar colas, mediante el cambio en la forma del sistema rotatorio. Esto normalmente resulta en una geometría menos “circular” y más “triangular o cuadrada”.

3.1 SEGURIDAD

La introducción de semáforos en sistemas rotatorios puede regular los patrones de tráfico, reducir la necesidad de maniobras de entrecruzamiento y fusión, remover los problemas de búsqueda de espacio de los vehículos que ingresan y reducir las velocidades. Por ello, los semáforos son particularmente beneficiosos para ciclistas y además pueden proveer un mayor control para los peatones, si se compara con las rotondas con prioridad.

En rotondas grandes, es posible alcanzar reducciones substanciales de accidentes entre vehículos que entran con aquellos que están circulando. Por ejemplo, en rotondas controladas con prioridad los accidentes a menudo ocurren en las entradas donde los conductores encuentran difícil interpretar los espacios disponibles y su dimensión. El control con semáforos evita esta duda.

¹ The Institution of Highways & Transportations. Transport in the urban environment. London, England. June, 1997.

Introducción de enlaces adicionales

Por su naturaleza, las rotondas fuerzan al tráfico circular, pero a veces esto puede crear conflictos que pueden evitarse si una ruta más directa fuera provista para movimientos de tráfico particulares. El cortar por el centro de la rotonda con el flujo dominante es el caso extremo, lo que hace posible proveer flujos de saturación más altos para estos movimientos, puesto que ellos pueden tener un alineamiento más recto. Estos sistemas giratorios, que proveen enlace directo para los movimientos de tráfico más elevados, pueden llevar a confusión. Por ello, el cortar una esquina de la rotonda con un “arco” que lleve un relativamente menor flujo puede ser una alternativa más segura para reducir los conflictos de tráfico.

4. PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS ROTATORIOS

4.1. DATOS PARA EL DISEÑO

El paso inicial en el dibujo de un diseño para una rotonda semaforizada es la elección del emplazamiento apropiado. Los principales datos a coleccionar para el diseño de sistemas giratorios se refieren a los volúmenes de tráfico en forma de una matriz O-D, tanto para las horas pico como para las horas valle (si se dispone de los datos), donde el “origen” de cada vehículo es el punto de entrada a la rotonda y el “destino” es el punto de salida.

Para peatones y ciclistas, los flujos actuales no necesariamente son la mejor evaluación de necesidades, ya que la demanda puede estar suprimida por el emplazamiento de la intersección existente. Es importante evaluar las líneas de deseo de los movimientos para peatones y ciclistas.

Debe considerarse alternativas de diseño de intersecciones, incluyendo semáforos convencionales, rotondas sin control y emplazamientos especiales (donde se justifique por consideraciones de sitio, niveles de tráfico, distribución y mezcla). “Signabouts” (rotondas semáforo), “throughabouts” (rotondas “hamburguesa”) e intersecciones con

movimientos de giro segregados o separación vertical, que también deberían ser considerados. Donde hay un flujo pesado dominante, a través de la intersección, puede que se considere un “throughabout” como el más adecuado, ya que ofrece una ruta directa con potencialmente más capacidad y menos demora para estos movimientos. El proceso de diseño es esencialmente el mismo que el de rotondas convencionales, con los mismos requerimientos de modelación y evaluación.

4.2. DIAGRAMAS FLUJO-CARRIL

Las herramientas de evaluación como TRANSYT y LinSig modelan el tráfico como una red de nodos unidos por enlaces (o arcos) que llevan el tránsito. Los semáforos en cada nodo controlan el flujo de tránsito en estos enlaces. En intersecciones simples con semáforos, un enfoque de multi-carril puede ser modelado como un único enlace ya que el tráfico se distribuirá por sí mismo en forma uniforme entre los carriles disponibles. En rotondas controladas por semáforos, la elección de carril, tanto en las aproximaciones como en la calzada circulatoria, es dependiente de la salida pretendida por un vehículo individual.

La mejor forma de representar los datos de flujo son los diagramas de “flujo-carril”. Estos diagramas son esenciales porque²:

- Cada carril puede ser modelado separadamente;
- Cada movimiento puede ser asignado a un carril apropiado desde la entrada a la salida;
- Optimizar el uso de los carriles es la clave para un diseño exitoso.

Los diagramas Flujo-carril indican la forma en que el tráfico se distribuirá en las aproximaciones y a través de la rotonda, para un emplazamiento particular del giratorio y demarcación direccional en carriles. Ellos

² The Institution of Highways & Transportations. Transport in the urban environment. London, England. June, 1997.

también pueden proveer una indicación de si el diseño propuesto resulta en una solución dentro de la capacidad. Los diagramas Flujo-carril necesitan ser preparados para cada una de las situaciones de tráfico que se modelan.

Los cambios en la configuración geométrica pueden también ser examinados en los diagramas flujo-carril. Estos pueden incluir carriles adicionales o convertir una aproximación ensanchada de rotonda (flared approach) en una aproximación ensanchada semaforizada.

El reducir la deflexión en una aproximación de una rotonda no semaforizada (que normalmente se provee para reducir la velocidad de entrada) puede mejorar la visibilidad a la izquierda para los conductores que ingresan a la rotonda. La disponibilidad de espacio y la necesidad de mover los servicios necesitan ser considerados antes de decidir en los cambios al emplazamiento físico de una rotonda.

4.3. VERIFICACIÓN DE CAPACIDAD

Los nodos individuales semaforizados en una rotonda usualmente operarán como semáforos simples de dos estados. Una vez que se haya construido un borrador de un diagrama flujo-carril, un chequeo simple mostrará si un nodo tendrá suficiente capacidad. Si se suman los flujos más altos de carriles individuales de cada una de las dos líneas de parada (carriles críticos), entonces un total de menos de aproximadamente 1,100 pcu/hr indicaría que es probable que exista suficiente capacidad. Esto se basa en un tiempo de ciclo asumido de 60 segundos, 5 segundos de periodo entre-verde, un flujo de saturación de 1,200 pcu/hr y un grado de saturación para los nodos de 90 por ciento.

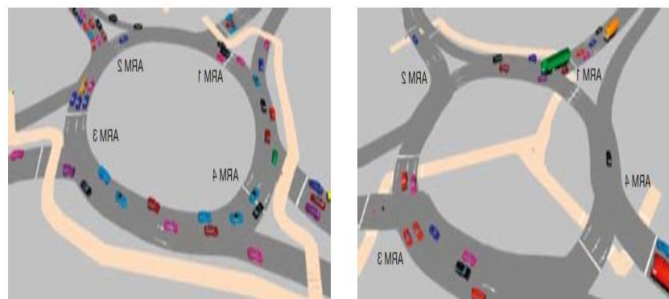
Si la suma de los flujos de carriles críticos es en exceso de 1,100 pcu/hr, será necesario ajustar la designación de carriles para distribuir los flujos de una manera más uniforme y/o considerar la provisión de carriles adicionales. Alternativamente, puede ser posible dejar la entrada sin semaforización si reúne los criterios necesarios.

4.4. FACILIDADES PARA PEATONES

Donde existen movimientos peatonales en el área cubierta por la rotonda, la semaforización permite disponer de una oportunidad para proveer de sitios de cruce seguros para peatones. Un cruce en una entrada semaforizada puede ser provista por un simple arreglo “camina-con-el-tráfico”, lo cual significa que los peatones aprovecharán los rojos de las fases semafóricas o el espacio que se presenta en el flujo de tráfico para realizar el cruce. Un cruce en una salida debe ser ubicado a una corta distancia (normalmente, al menos a 20 metros) lejos de la rotonda, para permitir un espacio para que el tráfico existente espere sin bloquear la rotonda. Si se va a proveer de facilidades para el cruce controlado en una rotonda semaforizada, entonces los cruces deben ser provistos de manera que los peatones o ciclistas puedan completar sus rutas deseadas a través de la rotonda; por ejemplo, a través de ambos brazos, de entrada y salida.

A continuación, se muestran dos posibles maneras de tratar con el cruce de peatones en un sistema giratorio³.

Figura N° 1 Alternativas para paso peatonal



Fuente: Department for Transport. Local Transport Note 1/09. Signal Controlled Roundabouts.

Esto resulta en cruces para peatones escalonados izquierda/derecha. Para cruces individuales en una vía con separación con andén, un escalamiento derecha/izquierda es normalmente

³ Department for Transport. Local Transport Note 1/09. Signal Controlled Roundabouts. Inglaterra. 2009.

recomendado. La preferencia por un escalonamiento derecha/izquierda se basa en la ventaja de seguridad asumida de caminar contra el tráfico que viene cuando se aproxima a la segunda mitad del cruce. En una rotonda, esto está balanceado por la ventaja de cruzar más alejado de la salida misma, y el escalonamiento izquierda/derecha es la alternativa preferida. Para cruces peatonales a través de las salidas de una rotonda, el escalonamiento izquierda/derecha es aceptable.

Por razones de seguridad, es preferible programar los semáforos en una salida de manera tal que el rojo se presente al flujo que se mueve más lento en lugar de al que se mueve más rápido. El tráfico que sale en la primera salida después de unirse a la rotonda es probable que se esté moviendo más lentamente que el tráfico que ha entrado más antes.

Dependiendo de la naturaleza física del sitio y de las líneas de deseo para peatones y ciclistas puede haber ventajas en proveer puntos de cruce a través de la calzada circulatoria. Si esto puede ser dispuesto para evitar el uso de los cruces de salida, puede haber beneficios en reducir las demoras a vehículos y las rutas más directas pueden además demoras a peatones y ciclistas. Por otro lado, proveer cruces a través de la calzada circulatoria reducirá el espacio de cola para vehículos.

En resumen, el disponer de cruces peatonales a través de la rotonda:

- Reduce las demoras a peatones;
- Puede evitar la necesidad de cruces en salidas;
- Pero, reduce el espacio para colas en la rotonda.

Lo anterior también se aplica a ciclistas.

5. DISEÑO DE UN SISTEMA ROTATORIO

Para la aplicación práctica de diseño de un sistema rotatorio se ha decidido tomar como caso de estudio una de las rotondas ubicadas en la Av. Bolivia de la ciudad de El Alto. En esta ciudad se dispone de algunas rotondas de tamaño mediano y grande, con baja actividad de

comercio circundante y en donde no se observa una gran cantidad de paradas de transporte público en los carriles de circulación ni en los brazos de aproximación.

En la Av. Bolivia se localizan tres rotondas que son las siguientes:

1. Av. Bolivia con Av. Julio César Valdés (Rotonda de la Cruz).
2. Av. Bolivia con Av. Ladislao Cabrera.
3. Av. Bolivia con Av. Los Álamos.

La primera rotonda dispone de un Diámetro de Círculo Inscrito (ICD por sus siglas en inglés) de aproximadamente 112 metros, con bajo flujo peatonal, actividad de paradas de transporte público limitada y volúmenes de tránsito medios en las cuatro aproximaciones.

La segunda rotonda tiene un ICD de aproximadamente 75 metros, con elevado volumen de tráfico vehicular y peatonal, y gran cantidad de sitios en donde paran los vehículos de transporte público. En el sitio de emplazamiento de la rotonda se ha construido y opera un paso a desnivel que permite el flujo directo Sur-Norte y viceversa por la Av. Ladislao Cabrera. Este paso a desnivel y la condición de que la rotonda alberga a varias paradas de transporte público hace que la misma no sea adecuada para adoptarla como caso de aplicación para el presente estudio.

La tercera rotonda ubicada en la intersección con la Av. Los Álamos tiene un ICD de aproximadamente 93 metros, el flujo vehicular que transita por ella es relativamente bajo y tampoco se dispone de un significativo volumen de tránsito peatonal.

Luego de una inspección ocular realizada en las tres rotondas, se ha decidido que la más adecuada para el análisis a realizar (diseño de rotonda semaforizada) corresponde a la primera, dado que se puede considerar como una rotonda de dimensiones relativamente grandes (ICD de 115 m.), tiene significativo volumen de tráfico vehicular (casi equilibrado en las cuatro aproximaciones) y el conflicto por paradas de transporte público es relativamente bajo.

En las figuras a continuación se muestran algunas vistas de la rotonda adoptada para el caso de estudio.

Figura N° 2 Ubicación de Rotonda de la Cruz



Fuente: Google Earth.

Aunque la rotonda no dispone de un control semafórico, se puede verificar que la misma no ha sido diseñada de acuerdo a las normas de rotondas modernas⁴.

Figura N° 3 Vistas de Rotonda de la Cruz



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Google Earth.

⁴ Federal Highway Administration. Roundabouts: An informational guide. National Cooperative Highway Research Program. Report 672. Transportation Research Board. United States. 2010.

5.1 TRABAJOS DE CAMPO

Para realizar el diseño de una rotonda semaforizada se requiere conocer la geometría y el emplazamiento de la intersección, así como la demanda vehicular y peatonal que necesita cubrir para un buen desempeño. Por ello, se ha propuesto coleccionar información de los siguientes insumos básicos:

- Información de cartografía de la intersección;
- Demarcación y tipo de control en la operación;
- Datos de volúmenes vehiculares en forma de matrices O-D; y
- Datos de volúmenes peatonales.

A continuación, se describe la metodología que ha sido utilizada para la colecta de cada uno de estos datos básicos.

5.2 CARTOGRAFÍA

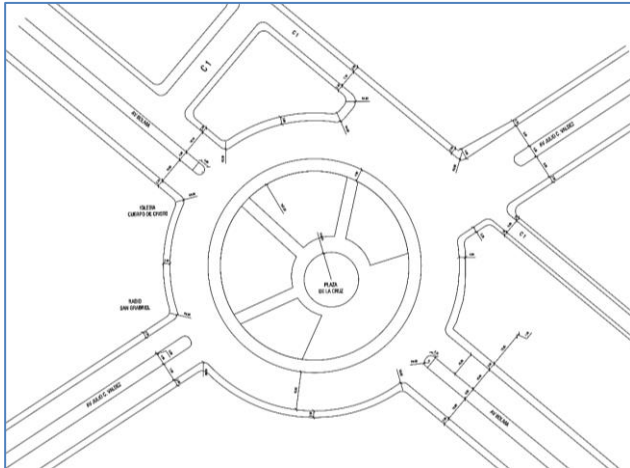
La cartografía de la intersección fue determinada por medio de mediciones en sitio, realizadas como parte de un inventario vial. El inventario permitió observar las principales dimensiones del emplazamiento de la rotonda para replantear la geometría con indicación de:

- Ancho y número de carriles de cada aproximación en cada entrada a la rotonda;
- Anchos de la calzada circulatoria;
- Anchos de acera en todas las vías de aproximación y en el interior de la rotonda;
- Radios de esquinas de aceras;
- Emplazamiento y dimensiones de la isleta circular central; y
- Disposición de andenes en la isleta circular central.

Con los datos levantados en el inventario se ha confeccionado un plano base de la geometría actual de la rotonda, el cual servirá de base para el desarrollo del caso de estudio. La geometría final ha sido ajustada sobreponiendo el bosquejo obtenido del inventario sobre una base

fotográfica extraída de Google Earth. La geometría de la rotonda con acotación se presenta en la figura a continuación.

Figura N° 4 Cartografía base para rotonda de análisis (Sin escala)



Fuente: Elaboración propia.

5.3 CONTEOS DE DEMANDA

Para la determinación de la demanda de tráfico en la rotonda se realizaron dos tipos de aforo:

- Aforos vehiculares direccionales; y
- Aforos peatonales.

Los aforos vehiculares clasificados fueron realizados en un día hábil de la semana, en condiciones normales de tráfico, en los periodos de Hora Pico AM (7:00-9:00) y Hora Pico PM (18:00-20:00), registrando todos los movimientos direccionales en la intersección, clasificando a los vehículos según su tipo (vehículos particulares, taxis, minibuses, microbuses, camiones y otros). Estos conteos fueron realizados los días jueves 28 y viernes 29 de julio de 2016.

Los aforos peatonales se realizaron solamente en los sitios en donde existe una mayor cantidad de peatones que cruzan o transitan en las vías que conforman los brazos de aproximación de la rotonda. Los conteos peatonales también clasificaron a los peatones según el tipo, considerando: niños, jóvenes, adultos, personas de tercera edad y personas con movilidad reducida.

Volúmenes vehiculares

En la Figura No. 5 se muestra un resumen de los conteos vehiculares para las Horas Pico AM y PM. En las tablas siguientes se muestran los volúmenes observados en estos periodos y, más adelante, las matrices O-D determinadas.

Tabla N° 1 Resumen de volúmenes vehiculares-Hora Pico AM

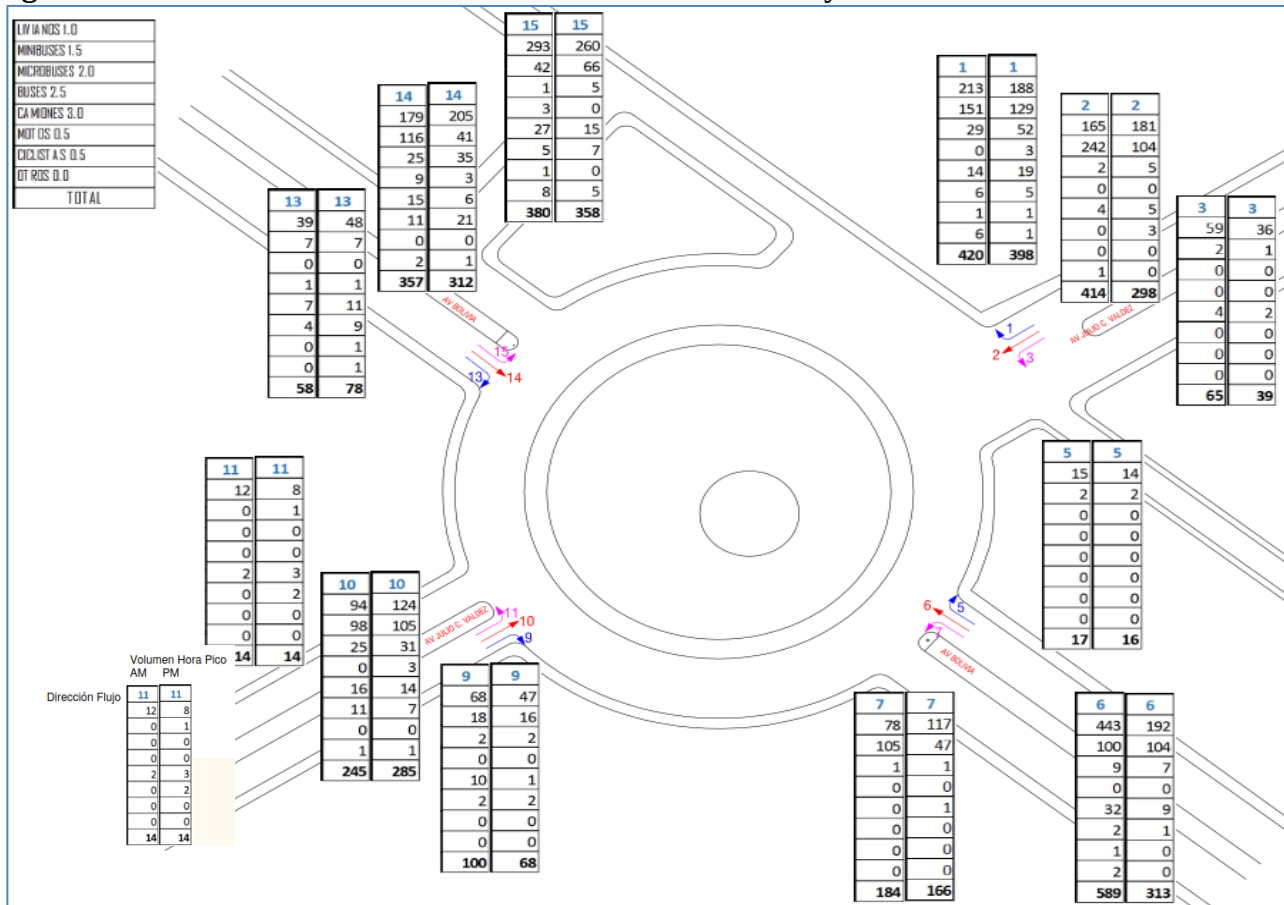
TIPO DE VEHÍCULO Y (FACTOR) UVP	DIRECCIÓN DE MOVIMIENTO															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
LIVIANOS 1.0	213	165	59	0	15	443	78	0	68	94	12	0	39	179	293	0
MINIBUSES 1.5	151	242	2	0	2	100	105	0	18	98	0	0	7	116	42	0
MICROBUSES 2.0	29	2	0	0	0	9	1	0	2	25	0	0	0	25	1	0
BUSES 2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	3	0
CAMIONES 2.5	14	4	4	0	0	32	0	0	10	16	2	0	7	15	27	0
MOTOS 0.5	6	0	0	0	0	2	0	0	2	11	0	0	4	11	5	0
CICLISTAS 0.5	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
OTROS 2.0	6	1	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	2	8	0
TOTAL	420	414	65	0	17	589	184	0	100	245	14	0	58	357	380	0
UVP	548	544	72	0	18	697	238	0	125	339	17	0	72	473	452	0

Tabla N° 2 Resumen de volúmenes vehiculares-Hora Pico PM

TIPO DE VEHÍCULO Y (FACTOR) UVP	DIRECCIÓN DE MOVIMIENTO															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
LIVIANOS 1.0	188	181	36	0	14	192	117	0	47	124	8	0	48	205	260	0
MINIBUSES 1.5	129	104	1	0	2	104	47	0	16	105	1	0	7	41	66	0
MICROBUSES 2.0	52	5	0	0	0	7	1	0	2	31	0	0	0	35	5	0
BUSES 2.5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	3	0	0
CAMIONES 2.5	19	5	2	0	0	9	1	0	1	14	3	0	11	6	15	0
MOTOS 0.5	5	3	0	0	0	1	0	0	2	7	2	0	9	21	7	0
CICLISTAS 0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
OTROS 2.0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	5	0
TOTAL	398	298	39	0	16	313	166	0	68	285	14	0	78	312	358	0
UVP	546	361	43	0	17	385	192	0	79	392	18	0	96	372	420	0

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 5 Volúmenes de tránsito vehicular Hora Pico AM y PM



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3 Matriz O-D Volúmenes vehiculares-Hora Pico AM (en UVP/hr)

HORA PICO AM		A	B	C	D	
OD		Bolivia Oeste	Valdez Norte	Bolivia Este	Valdez Sur	Total
A	Bolivia Oeste	0	452	473	72	997
B	Valdez Norte	548	0	72	544	1164
C	Bolivia Este	697	18	0	238	953
D	Valdez Sur	17	339	125	0	481
Total		1262	809	670	854	

Tabla N° 4 Matriz O-D Volúmenes vehiculares-Hora Pico PM (en UVP/hr)

HORA PICO PM		A	B	C	D	
OD		Bolivia Oeste	Valdez Norte	Bolivia Este	Valdez Sur	Total
A	Bolivia Oeste	0	420	372	96	888
B	Valdez Norte	546	0	43	361	950
C	Bolivia Este	385	17	0	192	594
D	Valdez Sur	18	392	79	0	489
Total		949	829	494	649	

Fuente: Elaboración propia.

De las figuras y tablas anteriores se puede observar que, en el periodo pico AM, los principales volúmenes corresponden a los flujos desde la Av. Bolivia Oeste hacia Av. Bolivia Este y Av. Valdez Norte; desde la Av. Valdez Norte los flujos principales se dirigen hacia Bolivia Oeste y Valdez Sur; De Av. Bolivia Este el flujo mayor se dirige a Av. Bolivia Oeste; y finalmente, desde la Av. Valdez Sur el flujo principal corresponde al que se dirige hacia Valdez Norte.

Por otro lado, los volúmenes de tráfico en la hora pico PM, en general son similares a los del anterior periodo, con la diferencia de que los flujos Valdez Norte a Valdez Sur y Bolivia Este a Bolivia Oeste son más reducidos que los correspondientes a los del pico mañana.

Resulta un poco sorprendente el hecho de que el flujo total de la Av. Valdez Norte en la mañana sea superior al del sentido inverso, lo cual no se explica con los flujos inversos de la hora pico de la noche.

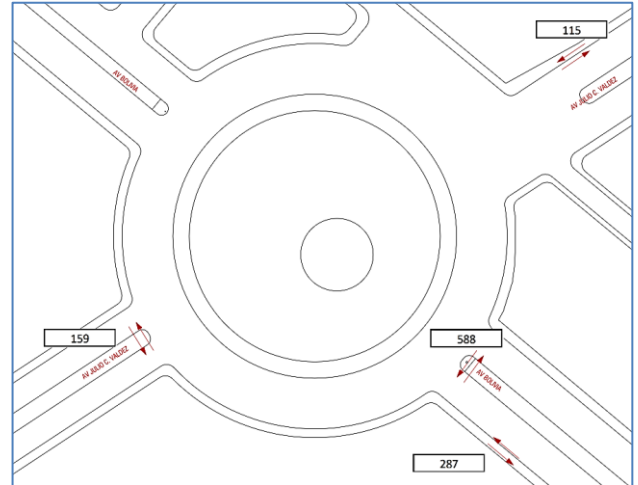
Un hecho claro es que el volumen más alto corresponde al flujo directo en la Av. Bolivia, de Este a Oeste y viceversa. En casi la misma magnitud se encuentran los flujos entre Av. Bolivia Oeste y Av. Valdez Norte, lo cual es más crítico por el giro izquierdo que involucra.

Flujos peatonales

Los principales volúmenes peatonales que se observan en la Rotonda de la Cruz corresponden a los que ocurren en los brazos de aproximación de Av. Valdez Sur y Av. Bolivia Este. En particular se ha observado que, en la hora pico de la mañana, varios peatones cruzan estos dos brazos de la intersección para acceder a una parada accidental de transporte público que se ha consolidado en la calzada circulatoria en el ingreso de la Av. Bolivia Este.

A continuación, se muestran los principales volúmenes peatonales observados en la rotonda en la Hora Pico AM.

Figura N° 6 Volúmenes peatonales observados en Hora Pico AM (peatones/hr).



Fuente: Elaboración propia.

5.4 DISEÑO DE SISTEMA GIRATORIO

Datos para diseño

Como se ha indicado antes, el paso inicial para el diseño de un sistema giratorio semaforizado es disponer de los volúmenes de tráfico vehicular, en forma de una matriz O-D, para las horas críticas. Para peatones y ciclistas, los flujos actuales no necesariamente son la mejor evaluación de necesidades, ya que la demanda puede estar suprimida por el emplazamiento de la intersección existente; por lo que es importante evaluar las líneas de deseo de los movimientos para estos usuarios.

Se ha visto que es conveniente evaluar alternativas de diseño, incluyendo semáforos convencionales, rotondas sin control y emplazamientos especiales (donde se justifique por consideraciones de sitio, niveles de tráfico, distribución y mezcla). “Signabouts” (rotondas semáforo), “throughabouts” (rotondas “hamburguesa”) e intersecciones con movimientos de giro segregados o separación vertical.

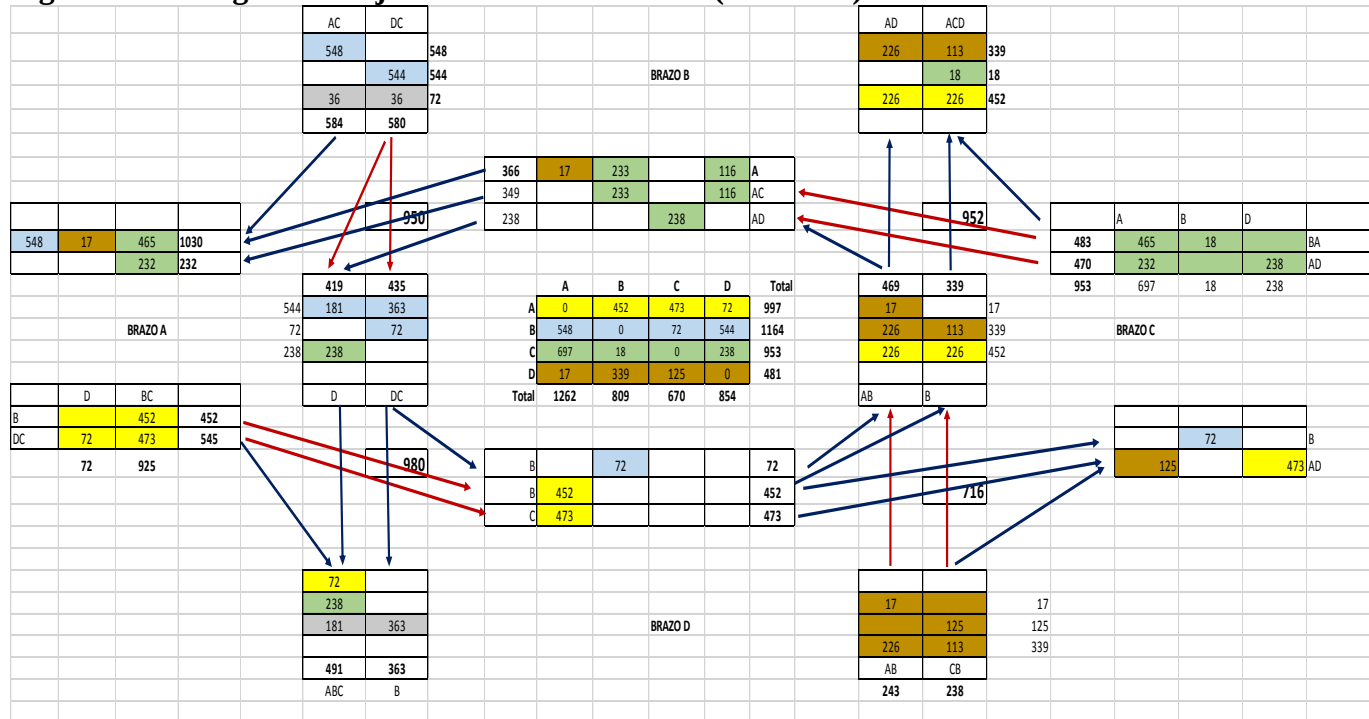
Cuando hay un flujo pesado dominante, a través de la intersección, puede ser necesario considerar un “throughabout” como el más adecuado, ya que ofrece una ruta directa con potencialmente más capacidad y menos demora para estos movimientos.

Con estas consideraciones, a continuación, se analizan los flujos de tráfico y la geometría de la Rotonda de la Cruz, objeto del presente estudio.

Diagramas Flujo-Carril

Como se ha mencionado en el marco teórico, los Diagramas Flujo-Carril constituyen la base para el adecuado diseño. Por ello, en la figura a continuación se presenta, a manera de ilustración, el diagrama Flujo-Carril para la Hora Pico AM.

Figura N° 7 Diagrama Flujo-Carril Hora Pico AM (7:30-8:30)



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar de la figura anterior, la distribución del tráfico en los carriles de la rotonda se puede representar mejor por medio de los diagramas flujo-por-carril, los cuales han sido preparados con los datos de las matrices O-D.

Los diagramas Flujo-carril indican la forma en que el tráfico se distribuirá en las aproximaciones y a través de la rotonda, para un emplazamiento particular del giratorio y demarcación direccional en carriles. Ellos también pueden proveer una indicación de si el diseño propuesto resulta en una solución dentro de la capacidad.

La utilización de un código de colores del diagrama flujo-carril (es decir, por tráfico de

origen y destino) ayuda a interpretar el diagrama y, en el caso de necesitar modelar con un software de simulación, ayuda en la producción de una estructura de arcos correcta para la modelación.

La demarcación de carriles es una parte integral del diseño preliminar. Durante el desarrollo del diseño pueden evaluarse diferentes configuraciones de demarcación de carril para ver cuál provee el mejor balance de los flujos entre carriles. La demarcación de carriles determina las conexiones entre las cajas en el diagrama flujo-carril, lo cual tendrá que ser revisado posteriormente.

De los diagramas Flujo-carril para el caso de estudio se puede inferir lo siguiente:

- Número de carriles de circulación crítico: 3
- Número mínimo de carriles de aproximación: 2

Parámetros de Diseño

Para el diseño del sistema rotatorio se han tomado en cuenta los siguientes parámetros de diseño:

- Velocidad de diseño
- Distancia de visibilidad
- Anchos de calzada
- Volúmenes de vehículos y peatones
- Vehículo de diseño
- Radio de esquinas

A continuación, se resumen los valores de los parámetros adoptados para el diseño.

Velocidad de diseño

Cuando se va a realizar el diseño de una vía urbana, la velocidad de diseño se determina normalmente de la velocidad límite que se dispone en la vía o realizando una medición de velocidades y determinando el 85 percentil de los valores observados. Sin embargo, dado que en las vías en donde se ubica la Rotonda de la Cruz se dispone de alguna actividad peatonal, se considera que la velocidad de diseño adecuada debe ser de máximo 30 km/hr para los enlaces o tramos de aproximación y de 20 km/hr para los movimientos en el interior de la rotonda.

Distancia de visibilidad

La distancia de visibilidad de frenado en las aproximaciones a la intersección es la que se utiliza para la verificación de visibilidad en el diseño de intersecciones. Cada carril de tránsito debe tener visión clara de al menos un semáforo primario asociado con su movimiento particular, desde una distancia equivalente a la Distancia Mínima de Visibilidad de Frenado Deseable. La franja de visibilidad debe ser incrementada para incluir la altura de los cabezales de semáforo, si se considera necesario.

Para el caso de vías urbanas, la distancia de visibilidad de parada no es la misma que para carreteras. Las distancias de visibilidad de parada, recomendadas para diferentes velocidades, se resumen en la tabla a continuación.

Tabla N° 5 Distancias de Visibilidad de Parada (DVP)

Velocidad (km/hr)	16	20	25	30	40
DVP (m)	9	12	16	20	31

Fuente: Elaboración propia con base a Manual for Streets⁵, Londres.

Anchos de Calzada

Los anchos de calzada deben ser apropiados para el contexto y uso particular de la vía. Los factores clave que se tomaron en cuenta fueron:

- El volumen del tráfico vehicular y la actividad peatonal;
- La composición del tráfico;
- Si se va a permitir el estacionamiento en calzada;
- La velocidad de diseño; y
- La curvatura de la vía.

En el caso de la Rotonda de la Cruz, por donde transitan vehículos largos (camiones y buses grandes), los carriles tendrán un ancho mínimo de 3.0 metros. Para permitir un desplazamiento cómodo de los vehículos en el interior del sistema giratorio se asume que el ancho mínimo para los carriles circulatorios será de 4.0 metros.

Volúmenes de vehículos y peatones

Los volúmenes de vehículos que conforman la demanda se obtienen de la información colectada en los trabajos de campo, los cuales fueron sistematizados para el diseño en los Diagramas Flujo-Carril. Estos volúmenes se

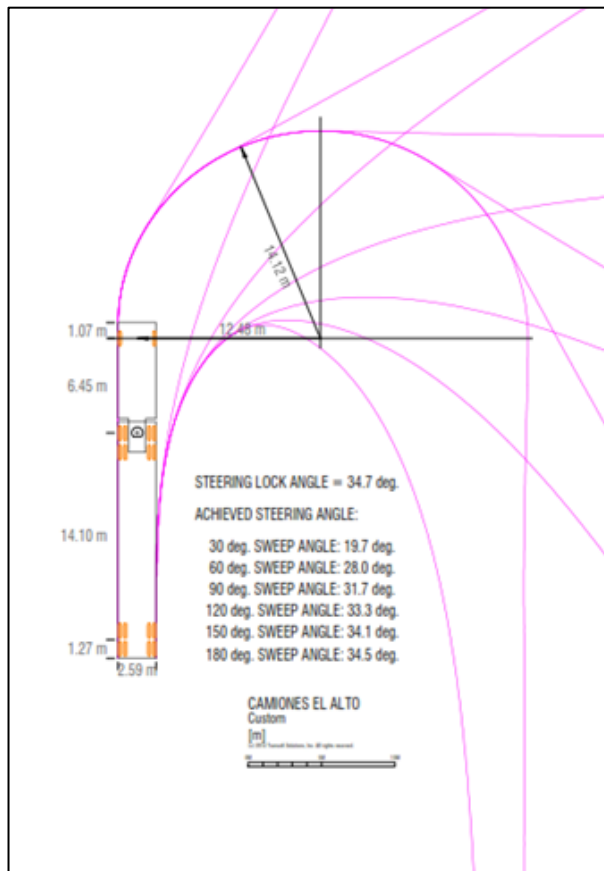
⁵ The Chartered Institution of Highways and Transportation. Manual for Streets 2. England. 2010.

utilizan en el diseño, tanto de la geometría, como de los tiempos de semáforo.

Vehículo de diseño

Para realizar y verificar el diseño geométrico, es necesario disponer de un vehículo de diseño. En el caso del diseño para intersecciones, de los conteos realizados, se ha establecido que el vehículo crítico corresponde a un bus de 12 m de longitud. Sin embargo, en horas de la noche, por las rutas en donde se emplaza la Rotonda de la Cruz también transitan camiones de transporte de carga pesada. Por ello, se ha considerado necesario adoptar el “camión con acople” como el vehículo de diseño.

Figura N° 8 Trayectorias de recorrido de vehículo de diseño



Fuente: Elaboración propia con Autoturn 9.0.

Las trayectorias del vehículo de diseño son importantes porque permiten verificar si la geometría a proponer en el diseño inicial cubre

los requerimientos de espacio de los vehículos que circularán por el emplazamiento de la rotonda.

Diseño de sistema giratorio

El proceso de diseño del sistema giratorio ha llevado a proponer dos alternativas:

- Alternativa 1. Sistema giratorio convencional con intersecciones controladas por semáforos.
- Alternativa 2. Sistema giratorio cortado por un arco, que permite la conexión más directa entre dos vías con elevado flujo.

Alternativa 1. En esta alternativa se han considerado los siguientes elementos:

- Se mantiene el emplazamiento de la isleta central, para evitar incrementar el costo de construcción.
- Se incluyen intersecciones controladas por semáforos en las 4 aproximaciones principales a la rotonda, con la Av. Bolivia y la Av. Julio César Valdez.
- Se modifica el “espacio inútil” en la parte norte del sistema rotatorio, de manera que la aproximación correspondiente a Av. Valdez Norte es regulada para un acceso controlado por semáforos.
- Se implementa un acceso exclusivo en la aproximación de Calle 1, con control de prioridad (Ceda el Paso), dado el reducido flujo local que existe en esta vía.
- Se rediseña el ancho de la calzada circulatoria para disponer de tres carriles de 4.0 m cada uno, lo que resulta en un ancho total de 12 m para esta calzada.
- Producto de la regulación de la calzada circulatoria, se dispone de aceras más amplias en todo el perímetro del sistema giratorio.
- Se rediseña las isletas en las 4 aproximaciones de manera que ellas permitan la conformación de un sistema con control semafórico.
- Se incorporan pasos peatonales en todas las líneas de parada con control semafórico, tanto en las aproximaciones

de ingreso como en los enlaces de la calzada circulatoria.

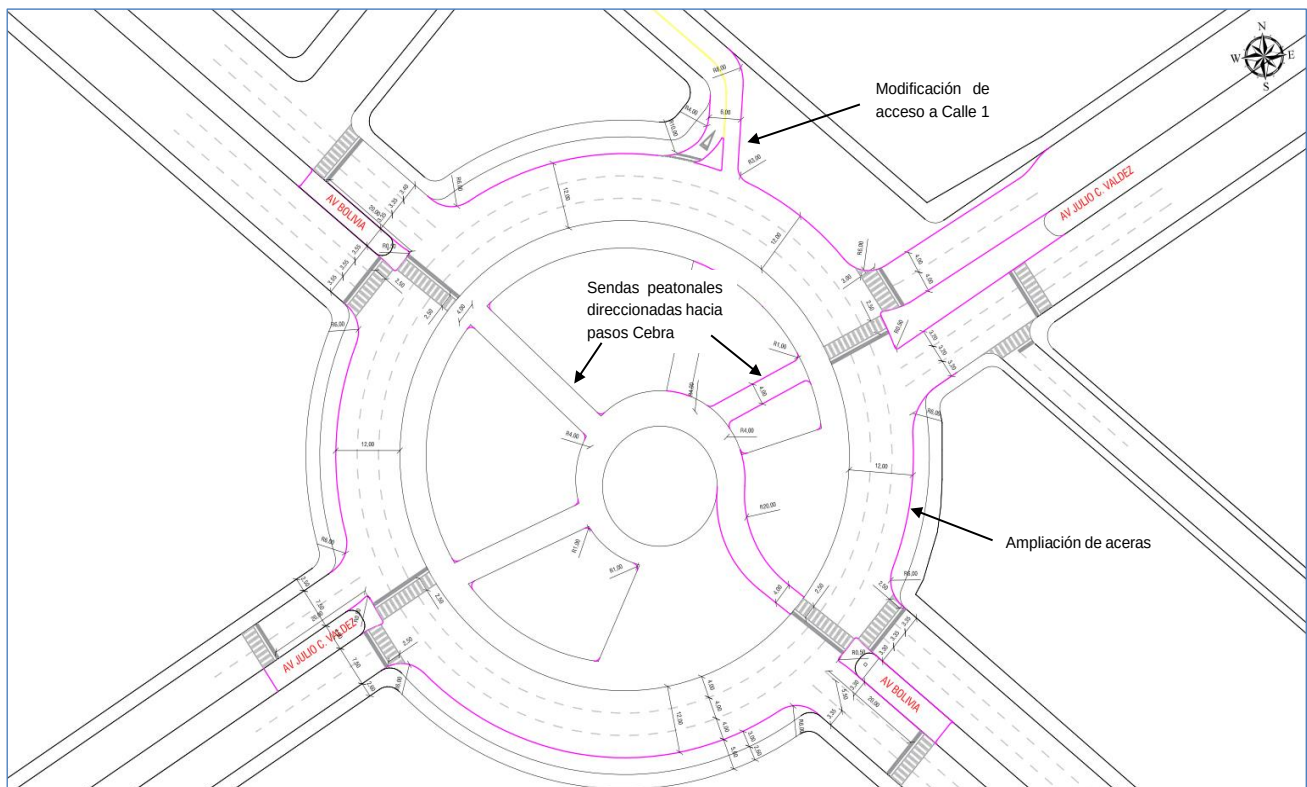
- Se incorporan pasos peatonales en las calzadas de salida de los brazos del giratorio, a una distancia de 20 metros de la rotonda, para evitar que se bloqueen las salidas por causa de la parada de vehículos en la salida.
- Se rediseñan las sendas peatonales en el interior de la isleta central para permitir el paso directo en prácticamente todas las direcciones, conectando todas las “líneas de deseo” de cruce peatonal que puedan existir.

- Se toma en cuenta el elevado volumen de vehículos que transitan entre Av. Bolivia Oeste a Av. Valdez Norte, para lo cual se propone un enlace directo de la primera a la segunda vía. Esta propuesta corresponde a una rotonda “cortada por un arco”.
- Control con semáforo de tres fases en nodo Av. Valdez Norte.
- El paso peatonal a través de la rotonda se complica con la inserción del “arco”, por lo que se propone sendas en los bordes del “arco”.

Alternativa 2. Esta alternativa mantiene gran parte del concepto de la primera alternativa, con las siguientes modificaciones:

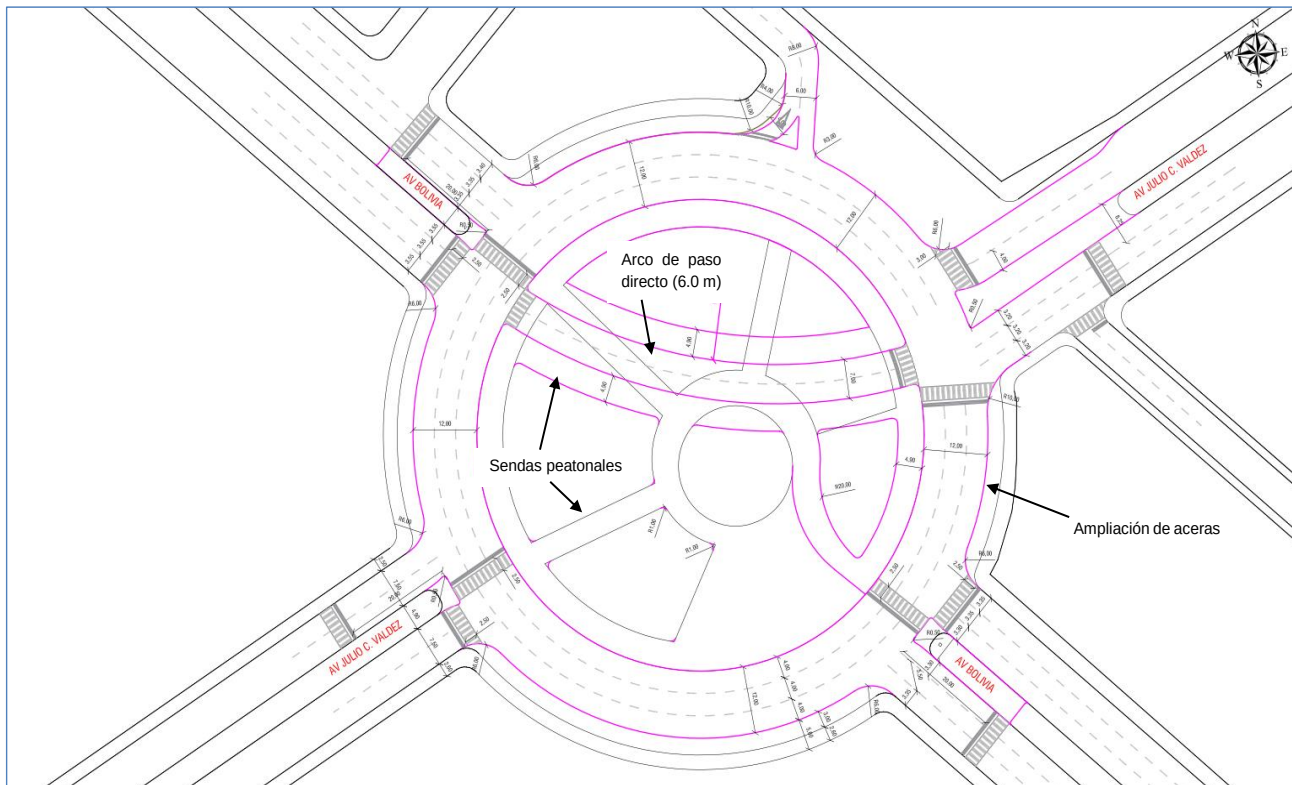
Las figuras siguientes muestran el diseño geométrico para las dos alternativas.

Figura N° 9 Diseño de geometría para Sistema Giratorio convencional– Alternativa 1



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 10 Diseño de geometría para Sistema giratorio con Arco directo – Alternativa 2



Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

1. The Institution of Highways & Transportations. *Transport in the urban environment*. London, England. June, 1997.
2. Department for Transport. *Local Transport Note 1/09. Signal Controlled Roundabouts*. England. 2009.
3. Federal Highway Administration. *Roundabouts: An informational guide. National Cooperative Highway Research Program. Report 672*. Transportation Research Board. United States. 2010.
4. The Chartered Institution of Highways and Transportation. *Manual for Streets 2*. England. 2010.