

Intersecciones tipo diamante divergente, análisis de implementación en ciudades colombianas

Divergent diamond type intersections, analysis of implementation in colombian cities

HERNÁN PORRAS DÍAZ

Ingeniero civil, doctor en Ingeniería Telemática. Docente e investigador de la Universidad Industrial de Santander. Santander, Colombia. hporras@uis.edu.co

YERLY FABIÁN MARTÍNEZ ESTUPIÑÁN

Ingeniero civil, candidato a magíster en Ingeniería Civil. Investigador de la Universidad Industrial de Santander. Santander, Colombia. yerlyfabianmartinez@gmail.com

Clasificación del artículo: Investigación (Conciencias)

Fecha de recepción: 4 de marzo de 2011

Fecha de aceptación: 30 de mayo de 2011

Palabras clave: Diamante, fases, intersección, parámetros.

Key words: Diamond, stages, intersection, parameters.

RESUMEN

Las intersecciones tipo diamante divergente son un estilo especial de alternativa de diseño muy reciente en el mundo para la solución de conflictos viales, su funcionamiento básicamente consiste en un cambio regulado semafóricamente de los sentidos de flujo; hasta el momento su implementación en países de Latinoamérica es nulo, lo que supone un desaprovechamiento de sus beneficios. En este trabajo se ha realizado un proceso de recopilación de la información acerca del diseño, uso y opera-

ción de este tipo de intersecciones en el mundo, se han analizado los modelos existentes relacionados con la operación vehicular y semafórica para su control. Todo este proceso se ha aplicado al análisis de un caso específico en la ciudad de Bucaramanga, donde la demanda vehicular como en otras ciudades colombianas está superando la oferta ofrecida por la infraestructura vial existente, mediante el uso de diferentes escenarios de simulación que permiten comparar y medir el grado de impacto de cada uno de los parámetros escogidos.

ABSTRACT

The diverging diamond-like junctions are a special type of very recent design alternative in the world for conflict resolution road, its basic function is to change the traffic light controlled flow directions and so far its implementation in countries Latin America is zero, which is a waste of your benefits. This work has been a process of gathering information about the design,

use and operation of such intersections in the world, we have analyzed the existing models related to vehicle operation and traffic lights to control. This whole process has been applied to analysis of a specific case in the city of Bucaramanga, where vehicular demand as in other Colombian cities is exceeding the supply offered by the existing road infrastructure, using different simulation scenarios for comparing and measuring the degree of impact of each of the parameters chosen.

* * *

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población y el desmedido crecimiento de las ciudades han traído consigo un fenómeno de desorden y caos, y, si a esto se le suma el aumento del parque automotor, conlleva a un deterioro de la movilidad tanto vehicular como peatonal y aún más, en el caso de países como el nuestro donde la infraestructura vial es ineficiente para hacerle frente a este fenómeno, lo cual se convierte en congestiones, largas filas de vehículos y contaminación.

Analizando desde el punto de vista de la infraestructura vial se hace necesario contar con alternativas de solución que permitan mejorar o disminuir problemas puntuales de intersecciones que son el punto de partida para el problema de caos vehicular, en este trabajo se plantea un caso particular de intersección conocida con el nombre de Intersección tipo Diamante, y una modificación de la misma conocida como *diverging diamond interchange*, que han sido implementadas en países de Europa y en ciudades norteamericanas, pero que a nivel latinoamericano no se tiene ningún tipo de antecedente, por ello, se presenta una recopilación de información acerca de la existencia, funcionamiento y operación de este tipo de intersecciones.

Además, se muestra cuáles son los parámetros que más inciden en su funcionamiento, para aplicarlos a un caso particular de una ciudad colombiana, Bucaramanga, estableciendo entornos de simulación que permiten medir el impacto de cada uno de ellos.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada consistió, primero, en un proceso de revisión bibliográfica acerca del uso y operación de las intersecciones tipo diamante en el mundo, se revisaron aspectos de diseño geométrico, capacidad vehicular, volúmenes vehiculares, velocidad de operación, modelos semafóricos de control, seguridad y desventajas de su implementación en cuanto al manejo peatonal, lo que permitió identificar y extraer los parámetros que intervienen en la implementación y que tienen más influencia en su funcionamiento.

Se identificaron los principales modelos utilizados para la operación de las mismas concentrando la atención en el manejo semafórico, mediante metodologías de análisis como son IDIRMS, ALINEA, INTRAS, TWO CAPACITY PHENOMENOM MODEL, entre otras.

Una vez definido todo lo anterior se seleccionó cuál podría ser el modelo que más aplicación tendría para la ciudad caso de estudio, con base en el comportamiento de la misma, se eligió a Bucaramanga, teniendo en cuenta la información recopilada y las condiciones necesarias para la implementación de este tipo de soluciones identificadas en el análisis bibliográfico, además, la selección también se basó en una necesidad que existe en la actualidad por mejorar la conexión entre el oriente y el occidente de la ciudad.

El siguiente paso consistió en el establecimiento de los escenarios de simulación necesarios, para lo cual se realizó el montaje del modelo de la situación actual en el software TRANSMODELER 2.0 con la información que posee la universidad en cuanto a conteos vehiculares, velocidades de operación, caracterización de la malla vial, producto de la elaboración del plan maestro de movilidad de la ciudad (del cual los autores del presente artículo hicieron parte del grupo de ingenieros encargados de su elaboración). Con el escenario de la situación actual se calibró el modelo para asegurar de esta manera que los resultados que se obtuvieran en los escenarios siguientes fueran lo más confiables y acertados. Los otros tres escenarios planteados corresponden, el primero a una aplicación del concepto de intersección diamante, el segundo al concepto de *diverging diamond interchange* y el tercero a una solución a desnivel que fue propuesta para este sector en el año 2007 por un grupo consultor de la ciudad.

Los resultados que se tomaron de cada escenario y que permitieron comparar y medir el grado de impacto de cada opción fueron el nivel de servicio y la velocidad para los diferentes corredores que se veían afectados por cada una de las opciones, además, se compararon resultados que tienen que ver con el tiempo de demora y número de paradas por vehículo; para la intersección principal en este estudio, con todos estos resulta-

dos se concluyó que el grado de efectividad de la solución con su pros y contras en cuanto a otras soluciones como el paso a desnivel. La investigación contó con apoyo de la autoridad de tránsito de la ciudad, para realizar una exposición de los resultados positivos y negativos que trae su implementación y que además permitió conocer el punto de vista de personas que se encuentran a diario en este campo en particular.

De esta forma se llevó a cabo el procedimiento para la generación de esta investigación.

3. ESTADO DEL ARTE

En el mundo existen novedosas soluciones para disminuir los problemas que se presentan en las intersecciones viales, pero muchas de estas soluciones representan grandes inversiones [1], convirtiéndose en alternativas inalcanzables para el caso de países en vía de desarrollo. En esta búsqueda de soluciones eficientes y económicas aparece una alternativa conocida como Diamond Interchange (DI) que es una solución que conduce el tráfico en sentido opuesto a la dirección normal de la vía [2] y a su vez existe un mejoramiento a dicho tipo de intersección que es conocido como la Diverging Diamond Interchange (DDI).

Este tipo de intersecciones fueron concebidas en Francia a mediados de los setenta, sus antecedentes muestran que se implementó por primera vez en la ciudad de Versailles France, en la intersección de la autopista A13 y 182 de RD (Avenida de Jardy), la intersección de la autopista A4 (avenida des Allies) y el Boulevard de Stalingrado en Le Perreux - sur-Marney en la ciudad de Seclin en la intersección de la autopista A1 y Encamine a d' Avelin.

En el continente americano en el otoño de 2000, Gilbert Chlewicki [3], un estudiante de posgrado de primer semestre en la Universidad de Maryland, College Park al iniciar su



Fig. 1. Intersección I-95 con I-695 Baltimore
Fuente: Google Earth

trabajo de grado para la maestría en Ingeniería de Transporte, analizó cómo algunos diseños de intersecciones provienen de conceptos de intercambiadores.

El ejemplo más destacado es el jughandle, que era muy común en Nueva Jersey ciudad natal de Chlewicki. El jughandle lleva el concepto de la utilización de una rampa de intercambio para reemplazar a la izquierda en una intersección directa [4]. Así Chlewicki comenzó a buscar en los intercambiadores para determinar si alguno de ellos podría ser convertido en un concepto a nivel. Una intersección única de este tipo existía en la intersección formada por la I-95 con la I-695 en el lado noreste de Baltimore.

En la Fig.1 se puede ver la configuración de esta intersección en Baltimore, desde cualquier dirección el diseño es simétrico en todos los lados, Chlewicki quería ver lo que sucedería en este tipo de intercambiador si todos los puentes separados fueran sustituidos por las intersecciones a nivel controladas por una señal de tráfico.

El diseño se veía prometedor, pero Chlewicki consideró que la prueba real del diseño sería posible si se garantizaran luces verdes a través del diseño, una vez que el conductor recibiera la

luz verde; en primer lugar se determinó que sólo sería posible sincronizando los movimientos de cada pista e incluso esto sólo era posible si la división del tiempo de la luz verde para ambas direcciones fuera casi idéntica.

El no poder pensar en un lugar donde este diseño a nivel se pueda utilizar, decidió modificar el diseño un poco, a “desenredar” uno de los caminos, de manera que sólo uno de los caminos se cruzara durante las maniobras de la intersección, la sincronización de las señales podría tener cabida para todos los movimientos incluidos los giros a la izquierda, llamando a este diseño de la intersección “criss-cross” [3] que luego llamo intersección con eliminación dividida sincronizada “(SSP) ya que el diseño tiene características donde se vería en una intersección dividida por etapas, pero ambas partes podrían tener el verde al mismo tiempo con la ventaja de la sincronización de señales adicionales. Más adelante cambió el nombre a intercambiador de diamantes divergentes” (DDI), debido a los múltiples puntos divergentes en todo el intercambio.

Chlewicki presentó su investigación en el 2º Simposio de calles urbanas en Anaheim, California, en julio de 2003. Varias personas quedaron impresionadas con la presentación, mientras que otros se mostraron escépticos. Una persona que le impresionó fue Joe Bared, PhD [5], PE de la Administración Federal de Carreteras (FHWA). Bared se ha especializado en la investigación de nuevos diseños geométricos en la FHWA y vio el potencial de estos diseños.

En el primer estudio hecho por K. Edara y G. Bared (2003) evaluaron la DDI y SSP que Bared cambió de nombre, la intersección de cruce doble o DXI en un escenario de volumen alto, medio y bajo. Los resultados fueron aún más prometedores. Tanto la DDI y DXI tuvieron una mejoría significativa respecto a los diseños convencionales en grandes volúmenes.

El siguiente candidato principal para la construcción de una DDI estaba en Kansas City, Missouri en la I-435 intercambio / Front Street. Al mismo tiempo, la FHWA quería estudiar el grado de seguridad de la DDI. Para el estudio utilizaron sus carreteras como simulador de conducción para evaluar la DDI. Usaron la I-435 / Front Street, encontrando que los conductores eran intuitivamente capaces de maniobrar dentro de la DDI y localizar el camino hacia su destino.

Don Saiko, PE, que es un gestor de proyectos del área de Springfield, Missouri Distrito de MoDOT, quiso investigar el diseño en el área de Springfield. Él consiguió el permiso para probar el diseño en la I-44 y Kansas Expressway (SR 13), que había estado experimentando grandes problemas de tráfico y seguridad, debidos principalmente a las pequeñas áreas de almacenamiento de giro a la izquierda en las rampas.

Un presupuesto de \$ 10 millones de dólares fue concedido para la construcción de este proyecto. Las simulaciones para el diseño parecían muy prometedoras para solucionar el tráfico y los problemas de seguridad. También fue un costo y una solución muy eficaz. La DDI sólo costó alrededor de \$ 3 millones de dólares, ahorrando 7 millones de dólares del costo presupuestado, el tiempo de construcción tardó seis meses en lugar de dos años como sucedía con las otras opciones.

El proyecto se terminó a tiempo y dentro del presupuesto, con la apertura de configuración DDI el 21 de junio de 2009 y la ceremonia de corte de cinta para la realización del proyecto el 7 de julio de 2009. El DDI ha sido un gran éxito en este intercambiador y puede considerarse que ha funcionado incluso mejor que lo indicado por los modelos de simulación.

Adicionalmente se han realizando investigaciones acerca de su implementación en el Virginia Polytechnic Institute y State University. El Departamento



Fig. 2. Intersección I-44 Springfield- Missouri

Fuente: Saiko PE. 2009

de Transporte de Missouri también está planeando construir 4 intersecciones de este tipo tres en Kansas City y una en St. Louis Country.

4. INTERSECCIONES DIAMANTE

Una intersección tipo diamante es definida como una vía de doble sentido que intercepta a dos vías adyacentes de un solo sentido, de la vía principal (freeway) salen cuatro rampas (frontageroads) que se unen a la vía secundaria [5], estos cruces que se generan son usualmente diseñados como intersecciones a nivel del tipo T. El paso a desnivel (overpass o underpass) puede darse tanto en el camino principal como en el secundario, esto dependiendo de las condiciones topográficas del terreno donde se vaya a construir y que difieren en su operación con respecto a una intersección típica, porque los giros a la izquierda en ambos sentidos se cruzan, evitando que se atiendan en simultáneo. Las Figs. 3 y 4 muestran la configuración para este tipo de intersecciones.

Entre las soluciones que ofrece este tipo de intersecciones está el proveer seguridad y comodidad a bajo costo [6], también permite mover el tráfico más rápido, porque los puntos donde los vehículos paran es reducido, un incremento de la capaci-

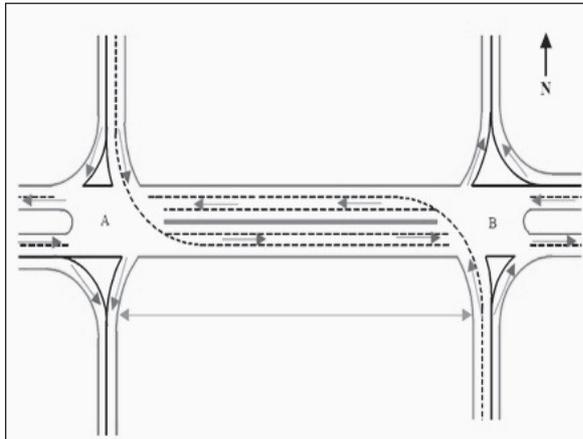


Fig. 3. Intersección tipo diamante [5].

dad en la intersección debido a la eliminación de la fase semafórica que contiene el giro izquierdo, además permite contar con una fase peatonal.

En el caso de la DDI, ésta dirige el tráfico mediante un cruce hacia el lado opuesto del camino entre la rampa terminal de la intersección, el cual se realiza mediante señales que controlan los movimientos de los vehículos, permitiendo tanto el cruce a la derecha como a la izquierda, sin ningún tipo de problema.

Además, en estudios realizados por Edara (2003) se hace una comparación entre estos dos tipos de intersecciones DI y DDI que dejan ver la efectivi-

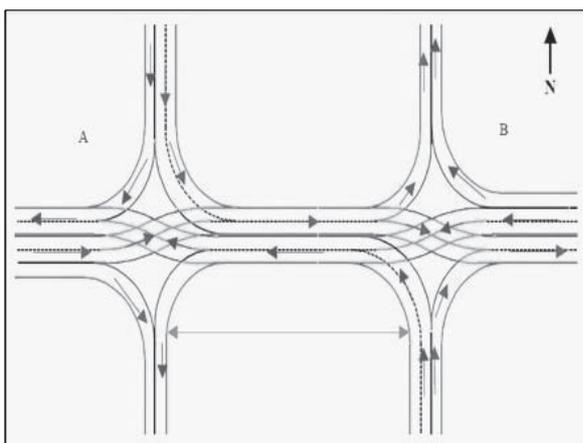


Fig. 4. Intersección tipo diverging diamond interchange [5].

Tabla 1. Comparación intersección diamante con intercambiador diamante divergente [8].

CRITERIO DE EVALUACIÓN	DI	DDI
Capacidad de la intersección	Media	Alta
Espacio intersección adyacente	Media	Alta
Progresión del vehículo al cruzar la calle	Media	Bajo
Seguridad del tráfico	Media	Media
Peatones/acomodo de bicicletas	Alto	Media
Costos de construcción	Media	Bajo/Alto
Costo de derecho de vía	Bajo	Bajos/Medio

dad del funcionamiento para la intersección tipo DDI cuando los volúmenes de tráfico son altos (entre 4000 y 5000 veh/hr) ofreciendo bajos tiempos de demora y de parada, menor número de paradas y disminuyendo la longitud de las colas, en el caso de volúmenes de tráfico bajos (menores a 1500 veh/hr) los dos tipos de intersecciones se comportan de manera muy similar.

En la tabla 1 se puede ver una comparación entre diferentes criterios de evaluación para cada una de estas soluciones.

4.1 Operación y funcionamiento

Una de los factores más determinantes de este tipo de intersecciones es la consideración de las fases semafóricas que regulen y controlen el tráfico, ya que la finalidad es evitar la formación de colas como lo dicen Mirchandani y Head (2000) [7], existen teorías acerca de la disposición de las diferentes fases semafóricas en estas intersecciones, como lo es la metodología del polígono de colas [8], que permite un análisis y una medición visual de las longitudes de cola en una intersección con el fin de definir las fases semafóricas de la misma, según la hora del día y del volumen de tráfico [9]; este tipo de intersecciones usualmente son controladas por tiempos de ciclo y fases

de señalización especiales, existen modelos de fases semafóricas establecidos, como el Texas Transportation Institute phasing (TTI) o de cuatro fases [4], el modelo de Tres fases y el sistema Lead-Lag, que han sido efectivos en la operación de este tipo de intersecciones disminuyendo las grandes colas en las horas pico.

4.1.1 Sistema de operación de cuatro fases

Se caracteriza por operar las fases en el sentido de las manecillas del reloj con el fin de garantizar que quien entra a la primera intersección en verde tenga de nuevo una fase verde en la segunda intersección. La principal ventaja es que en este tipo de operación los giros a la izquierda tienen la prioridad, garantizando un flujo rápido al interior de la intersección. Por otro lado, es un tipo de operación bastante eficiente, ya que permite el traslapo de dos fases (cerca de 8 segundos) entre los sentidos opuestos de la arteria principal que llega a la intersección, esto se logra gracias a los tiempos de viaje dentro de la intersección.

Otra ventaja que se puede observar es que mantiene el interior de la intersección limpio de tráfico. Esto es de gran ayuda cuando los giros izquierdos están muy cargados de tráfico y el espacio de almacenamiento dentro de la intersección es muy pequeño, debido a la proximidad de los dos caminos laterales [10], este tipo de fase es buena para conductores porque siempre provee una luz verde en el otro lado de la intersección, la TTI fase es equivalente a regular intersecciones con fases divididas en ambas calles comúnmente conocidas como “Electric All-Way Stop”.

El mayor problema de este tipo de operación es que restringe el flujo en los carriles más externos de la intersección, ya que se habilitan los giros a la izquierda pero se limitan los cruces frontales. Esto resulta ser un problema cuando los volúmenes de tráfico son mayores en direc-

ción de la arteria que llega a la intersección. Para este tipo de operación los ciclos no deben ser menores al doble del tiempo que toma cruzar la intersección, pues de lo contrario se provocará embotellamiento de carros en el interior de la intersección. Por otro lado, los ciclos semafóricos no deben ser mayores a lo necesario para proveer equidad en los cruces frontales, considerándose equitativo cuando el grado de saturación en todas las direcciones es semejante.

El modelo de cuatro fases utiliza una fase secuencial Lead-Lead, es decir, el movimiento de giro izquierdo se dirige a través de los movimientos en ambos lados de la intersección, y es así como se minimizan las colas internas, el término overlap utilizado en la Fig. 4 para describir el sistema de cuatro fases es una falsa fase usada con el propósito de garantizar la eficiencia en la progresión del tráfico, este esquema de fase es adecuado para intersecciones diamante que estén en espacios cerrados o con poco espacio, en la Fig. 5 se muestra la configuración de fases para este sistema de operación.

4.1.2 Sistema de operación de tres fases

En el caso de la operación mediante el uso del sistema de señales tipo Tres Fases, todos los movimientos corren simultáneamente, siendo más eficiente que la TTI cuando el almacenamiento es adecuado, la fase adicional es el giro izquierdo interior, la cual provee una gran flexibilidad en la asignación de los tiempos verdes y también permite generalmente ciclos cortos, esta fase sólo funciona cuando el interior de la intersección es suficientemente grande para mantener todo los giros izquierdos.

En este tipo de operación se le da prioridad a los cruces frontales los cuales tienen fases simultáneas. Al relegarse a un segundo plano los giros a la izquierda éstos se tornan lentos. Dado que en

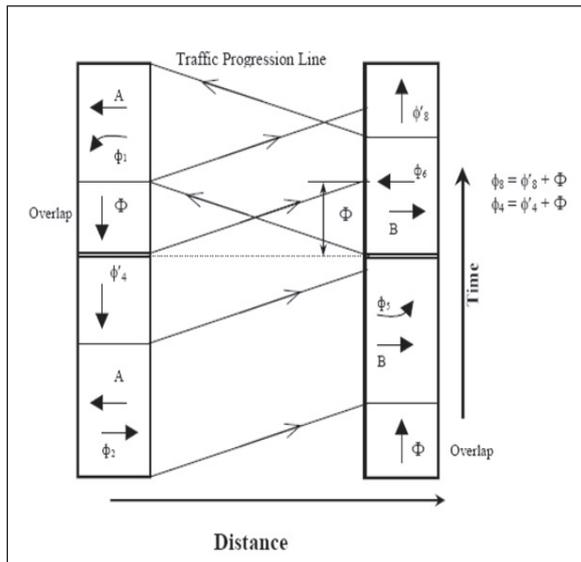


Fig. 5. Diagrama de progresión de cuatro fases.
Fuente: ZONGZHONG (2004)

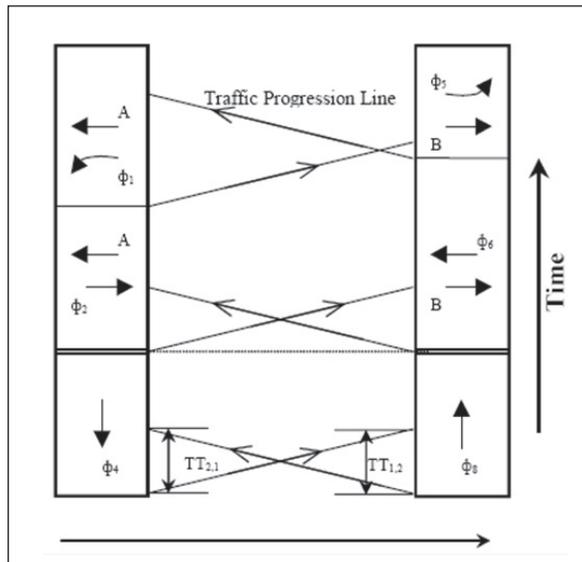


Fig. 6. Diagrama de progresión de tres fases
Fuente: ZONGZHONG (2004)

este tipo de operación las fases para los cruces frontales son simultáneas, no hay problemas de almacenamiento. A diferencia de un cruce típico con tres fases, este tipo de operación permite aliviar los giros a la izquierda por el interior y a su vez mantener cruces frontales, este tipo de comportamiento es conocido como una fase secuencial Lag-Lag, es decir, se retrasan los giros izquierdos respecto a los movimientos en ambos lados de la intersección haciendo énfasis en la progresión del tráfico a través de la vía arterial.

Las fases de rampa (ϕ_4 y ϕ) empiezan y terminan al mismo tiempo, seguido por el flujo a través de la vía arterial (ϕ_2 y ϕ_6) y las fases del giro izquierdo interno (ϕ_1 y ϕ_5) tal como se aprecia en la Fig. 6. La operación de ésta mantiene progresivo el tráfico a través de la vía arterial, es decir, el tráfico que atraviesa la intersección no para.

El tráfico que gira hacia la izquierda puede ser parado, pero puede ser despejado por el final del ciclo dando suficiente tiempo de verde para ϕ_1 y ϕ_5 . En conclusión este sistema es apropiado

cuando los caminos que llegan tienen demanda de tráficos balanceados y allí hay un gran espacio para almacenar los vehículos que harán el giro izquierdo [11].

4.1.3 Sistema de operación Lead -Lag

Cuando las divisiones resultantes del sistema de operación de cuatro fases no resultan eficientes y causan mucha congestión, y el almacenamiento es inadecuado para el sistema de operación de tres fases, el sistema de operación Lead-Lag puede venir como una solución alternativa. El giro izquierdo con mayor volumen de tráfico es usualmente mejor atendido por el giro izquierdo retardado de este sistema de operación, porque estos giros izquierdos tienen la menor de las esperas y estos están completamente vacíos antes de que los giros de las rampas de entrada sean atendidos.

Adicionalmente en estas intersecciones las fases de los cruces frontales no son en simultáneo para la primera y la segunda intersección, sino que se inicia primero la fase de la segunda intersección para aliviar el interior de la intersección.

5. CARACTERIZACIÓN CIUDADES COLOMBIANAS

La movilidad urbana en las ciudades colombianas ha crecido enormemente en las últimas décadas, correspondiendo esto con la evolución socioeconómica del país, debe añadirse la peculiaridad del fenómeno de desplazamiento de población que llega a las ciudades, como consecuencia del conflicto armado que se ha venido desarrollando desde hace más de 40 años encontrándose que los efectos del desplazamiento forzado han generado la movilidad de 2'500.000 colombianos de los campos a las ciudades en los últimos 15 años, según cifras de CODHES [12].

En ciudades orientales de nuestro país se presenta una tasa promedio de 2,5 viajes/persona/día [13], [14], si se tiene en cuenta la dificultad de contabilizar los viajes a pie producidos por el amplio sector informal que se ha generado por el fenómeno migratorio anteriormente mencionado, puede decirse que la movilidad actual en las ciudades colombianas debería encontrarse alrededor de los 3.0 viajes/persona/día, el cual es el valor que toma como referencia las instrucciones más recientes para estudios de movilidad urbana en Europa [14].

Se tiene entonces que en lugar de contribuir al desarrollo urbano planificado, la evolución del transporte ha contribuido a patrones de crecimiento desordenados y ha incrementado los niveles de congestión, accidentalidad y contaminación, encontrando que históricamente, los mayores esfuerzos para corregir las deficiencias de los sistemas de transporte han contribuido marginalmente a su mejoramiento y al de la movilidad urbana. Como es el caso de los programas de construcción de nuevas vías, de intersecciones a desnivel y el metro, con la convicción de solucionar a través de grandes proyectos de infraestructura los problemas de transporte.

5.1 Caso de uso ciudad de Bucaramanga

Para el caso de esta investigación se seleccionó una intersección típica de la ciudad de Bucaramanga, ubicada en el cruce formado por la carrera 27 una arteria principal de doble calzada con tres carriles, con la calle 56 una vía con dos carriles en cada sentido, que se constituyen en dos principales arterias vehiculares de esta ciudad, dado que allí confluyen importantes flujos de la malla vial arterial de la ciudad, permitiendo su permeabilidad hacia corredores como la carrera 33, Viaducto La Flora, Avenida González Valencia, Carrera 27, Intercambiador de la Puerta del Sol, Viaducto García Cadena, Par Vial Carreras 21 y 22, y la Carrera 15, entre otros.

La justificación de porqué se escogió esta intersección es que aparece como punto de control obligatorio para realizar la conexión directa entre el oriente y occidente de la ciudad, convirtiéndose en punto de conflicto debido a los altos flujos que se manejan en las horas pico, alrededor de 2,100 veh/hora además de la presencia de un sistema semafórico que maneja tres fases, de las cuales una corresponde a un giro izquierdo, provocando la aparición de largas colas, dichas fases presentan tiempos de ciclo de 60 segundos para el paso del flujo en el sentido sur - norte y norte - sur, 20 segundos para la fase que contiene el giro izquierdo, en este caso es en el sentido oriente - sur y el sentido oriente - occidente, para la tercera fase se maneja un tiempo de 25 segundos para los flujos occidente - oriente y oriente - occidente, lo que muestra el escaso tiempo que se presenta para el giro izquierdo para flujos que en horas pico llegan a los 1,250 veh/hora.

5.1.1 Parámetros usados

Para medir la efectividad de la aplicación del concepto de operación de las intersecciones diamantes para el caso de uso planteado en la ciudad de

Tabla 2. Flujos vehiculares intersección caso de estudio.

SENTIDO	VEHÍCULOS EQUIVALENTES
Oriente - Norte	125
Oriente - Occidente	875
Oriente - Sur	1155
Occidente - Oriente	330
Occidente - Sur	115
Sur - Oriente	95
Norte - Sur	1465
Sur - Norte	895

Fuente: Inventario de tráfico convenio UIS – Alcaldía de Bucaramanga 2009.

Bucaramanga, se estableció una simulación utilizando el software de simulación TRANSMODELER 2.0 desarrollado por Caliper Corporation, que permite manejar diferentes parámetros como son número y anchos de carriles, separadores, número y tipo de vehículos, circulación de peatones y unos de los parámetros más importantes para este análisis los tiempos y ciclos semafóricos.

Para esta intersección se conservaron los anchos de carril existentes de 3,30 m para el caso de la carrera 27 y 3,25 m para los carriles de la calle 56, el proceso de simulación se estableció para la hora pico de mediodía 11:45 a.m.- 12:45 p.m. que corresponde a la hora más cargada encontrada en este sector, manejando los flujos que se muestran en la tabla 3.

Se establecieron cuatro escenarios de simulación en los cuales se encontraba la situación actual que se utilizó como instrumento para la calibración de la simulación, un primer escenario corresponde a la situación actual, un segundo



Fig. 7. Alternativa para escenario de simulación 4.
Fuente: Área Metropolitana de Bucaramanga – ETA S.A.

escenario con la aplicación del concepto de DI, un tercer escenario utilizando la DDI y un cuarto escenario utilizando una solución a desnivel que fue propuesta para esta intersección en el año 2007 por un grupo consultor de la ciudad que consistía en una glorieta a desnivel que permitía la eliminación de la intersección semaforizada, en la Fig. 7 se muestra esta opción.

Para la operación semafórica se usaron 2 diferentes ciclos dependiendo de si el sistema usado era una DI o una DDI, en las Figs. 8 y 9 se muestran la configuración de las intersecciones consideradas.

Tabla 3. Tiempo semafóricos escenario 2 [8].

FASE	TIEMPO VERDE (seg.)
1	18a 65
2	17 a 64
3	71 a 95
4	70 a 119
5	124 a 112
6	101 a 10
7	18 a 102
8	18 a 87

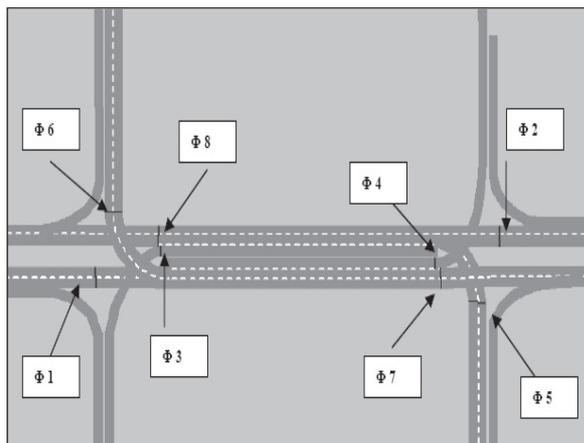


Fig. 8. Alternativa escenario de simulación 2 [8].

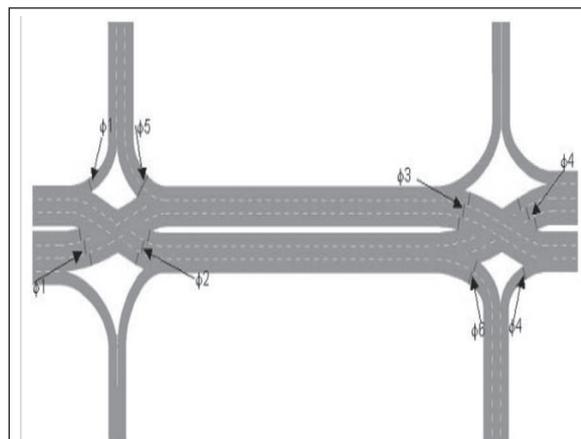


Fig. 9. Alternativa escenario de simulación 3 [5].

Tabla 4. Tiempos semafóricos escenario 3 [5].

FASE	TIEMPO VERDE (seg.)
1	70 a 23
2	28 a 65
3	60 a 30
4	35 a 55
5	28 a 65
6	60 a 30

6. RESULTADOS

Los resultados de las simulaciones se muestran en la tabla 5, donde se pueden observar las demoras por vehículo y por parada; en la tabla 6 se pueden observar las velocidades promedio y niveles de servicio que se presentan en cada uno de los corredores que conforman esta intersección, realizando una proyección de los flujos con base en las tasas de crecimiento anual que está presentando y que oscilan alrededor del 3,84% para periodos posteriores a la implementación de cada medida.

Tabla 5. Resultados para cada escenario de simulación.

CRITERIO EVALUADOR	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4
Total demoras (hr)	169,40	56,10	37,10	30,25
Demoras / Vehículo (seg)	79,70	80,20	26,70	12,45
Demoras por parada (seg)	132,60	83,40	19,70	11,15
Demoras por parada /Vehículo (seg)	62,40	62,50	14,20	10,15
Total paradas	7.706	6.755	4.205	2.045

Tabla 6. Resultados de velocidades y nivel de servicio para cada escenario.

TRAMO EN ANÁLISIS	ACTUAL		5 AÑOS		10 AÑOS		20 AÑOS	
	NDS	V (KPH)	NDS	V (KPH)	NDS	V (KPH)	NDS	V (KPH)
Calle 56	E	16,7	F	12,7	F	10,4	F	8,4
Carrera 27 (norte - sur)	E	16,3	E	15,4	F	13,2	F	11,1
Carrera 27 (sur - norte)	D	19,5	E	18,2	E	16,8	F	13,5
Calle 56	D	23,2	E	19,4	E	17,6	F	15,6
Carrera 27 (norte - sur)	D	20,1	E	18,9	E	17,1	F	14,7
Carrera 27 (sur - norte)	D	20,4	E	19,9	E	18,1	F	15,5
Calle 56	D	20,3	E	16,4	F	13,6	F	12,8
Carrera 27 (norte - sur)	D	21,8	D	20,3	E	18,1	F	15,5
Carrera 27 (sur - norte)	D	22,2	D	21,1	E	19,5	F	15,9
Calle 56	D	22,4	D	20,5	E	18,5	E	8,4
Carrera 27 (norte - sur)	D	21,5	E	19,8	E	16,4	F	11,1
Carrera 27 (sur - norte)	D	20,5	E	18,8	F	15,6	F	13,5

Los resultados dejan ver que la situación actual de funcionamiento de la intersección es deficiente, ya que se están presentando niveles de servicio E y velocidades relativamente bajas, al realizar la comparación de los escenarios 2 y 3 que corresponden a la aplicación del concepto de intersección diamante, se puede observar que es mucho más eficiente la implementación del tipo DDI ya que el número de paradas y demoras es mucho menor que para el caso de la DI convencional, al realizar la comparación de los escenarios 2 y 3 con el escenario 4 con base en los resultados que se muestran en la tabla 6 se observa que es más eficiente el esquema propuesto en el escenario 4, ya que los tiempos por parada y por número de vehículos son los menores de los 4 escenarios, pero si se hace la comparación con los resultados de la tabla 6, la diferencia entre los 3 escenarios no difiere mucho, pero sí presentan un gran alivio y mejoramiento en las velocidades y niveles de servicio con relación a la situación actual sin ningún tipo de alternativa.

Al analizar los escenarios 2 y 3 se observa que este último ofrece mejores condiciones de operación para las condiciones dadas en la intersección caso de estudio, esto se debe en parte al uso del sistema de cuatro fases que aplica para intersecciones donde se quiere mantener el verde continuo para la arteria principal.

7. CONCLUSIONES

Aunque el concepto de intersección diamante se ha venido usando desde los años setenta en Europa y ha sido de implementación más reciente en ciudades norteamericanas, para el caso de ciudades latinoamericanas resulta ser un concepto novedoso, que puede convertirse en una alternativa eficaz para la solución de conflictos viales.

Es por ello que, esta investigación buscó establecer las condiciones de operación de una intersección tipo diamante adaptada a los parámetros de

funcionamiento de una ciudad colombiana, permitiendo obtener resultados positivos en cuanto a velocidades y niveles de servicio en los corredores que conforman dicha intersección.

Además, la implementación de este tipo de soluciones trae consigo una serie de ventajas en cuanto a operación en relación con otras alternativas a desnivel que pueden ofrecer mejores resultados, pero que implican un costo mucho mayor además de una afectación predial que en algunos casos resulta siendo uno de los principales impedimentos para el desarrollo de proyectos de infraestructura en ciudades colombianas.

Debe buscarse en investigaciones futuras profundizar más en el tema del manejo peatonal y optimización del sistema de operación semafórico,

que permita hacer más eficiente la implementación de este tipo de intersecciones, además, complementarlo con una análisis de seguridad vial y análisis de costos que permita darle todo el soporte para la posible implementación real en un futuro no muy lejano.

8. FINANCIAMIENTO

Este trabajo forma parte de los resultados del proyecto de investigación titulado “Determinación de la viabilidad de la implementación de una intersección tipo diamante divergente en ciudades colombianas”, financiado por la Universidad Industrial de Santander - UIS, y por el grupo de investigación Geomática adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

REFERENCIAS

- [1] P. Smith. “Diverging Diamond Interchanges: Oregon’s Planned Applications”, *Presentation for the ITE District 6 Meeting, Portland: OR*, julio 2007.
- [2] D. Stanek. *Innovative Diamond Interchange Designs: How to Increase Capacity and Minimize Cost*, Roseville, 2006.
- [3] G. Chlewicki, *New Interchange and Intersection Designs: The Synchronized Split-Phasing Intersection and the Diverging Diamond Interchange*. Jacobs Civil Inc., Baltimore: Maryland, 2003.
- [4] R. Sunkari, *Signal Design manual for Diamond Interchanges*, Texas Transportation Institute, Urbanik, The Texas A&M University System, Austin-Texas: Sept. 2000.
- [5] K. Edara and G. Bared, “Diverging Diamond Interchange and Double Crossover Intersection - Vehicle and Pedestrian Performance”, *Department of Civil and Environmental Engineering, Science Direct: Virginia Polytechnic Institute and State University*, 2003.
- [6] K. Mahendrad, *Application of Nontraditional Interchange Treatments to Improve Quality of Service and Preserve the Service Life of Narrow Over- and Underpass Roadways*, The Faculty of the Graduate School Tennessee Technological University, mayo 2009.
- [7] P. Mirchandani and L. Head, *Time Traffic Signal Control System Architecture, Algorithms and Analysis*, Department of Systems and Industrial Engineering, University of Arizona, Tucson: Arizona, junio 2000.
- [8] S. Sharma and I. Chatterjee, “Comparative analysis of conventional diamond inter-

- change and contra Flow Left Turn (CFL) interchange,” *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Missouri, Columbia*, 2005.
- [9] A. Zagrawal and M. Hickman, *Automated Extraction of Queue Lengths from Airbone Imagery. Intelligent Transportation Systems Conference, Washington: D.C.*, Oct. 2004.
- [10] K. Zimmerman and J. Bonneson, “Development of a traffic signal operations handbook,” *Texas Transportation Institute the Texas A&M University System*, Sept. 2008.
- [11] T. Zongzhong, “Modeling and implementation of an integrated ramp metering-diamond Interchange Control System,” *Department of Civil and Environmental Engineering University of Nevada, Reno: USA*, Feb. 2007.
- [12] C. ACNUR. *Desplazamiento forzado interno en Colombia: Conflicto, Paz y Desarrollo. Bogotá. Colombia*. Citado en Torres, C. *Ciudad Informal y Movilidad*, 2005.
- [13] G. Duque, “Movilidad y desarrollo en el eje urbano y periurbano de Manizales.” *Fundamentos de Economía y Transportes*, Jun. 2006.
- [14] D. Escobar, “*Instrumentos y metodología de planes de movilidad y transporte en las ciudades medias colombianas*,” *Universidad Politécnica de Cataluña: Barcelona*, 2008.