

Universidad del Bío-Bío

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Profesor Patrocinante: Dr. Patricio Álvarez Mendoza

Profesor Comisión: Dr. Álvaro Suazo Schwencke

Franco Benedetti Leonelli



EFFECTO DE LA DEMANDA ASIMÉTRICA EN EL NIVEL DE SERVICIO DE ROTONDAS URBANAS.

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil

MARÍA PAZ SIEGEL SEPÚLVEDA

CONCEPCIÓN, ENERO 2015

*A mis padres, mis hermanas,
mi familia y mis amigos.*

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecer a Dios por todas sus bendiciones, por haberme guiado hasta ahora y haber puesto a hermosas personas en mi vida, por darme fuerza, sabiduría y perseverancia para cumplir mis objetivos. A él sea la honra y la gloria.

En segundo lugar agradecer a las personas que más amo en mi vida, mis padres Jeannette y Luis, gracias por siempre aconsejarme, ayudarme cuando lo necesitaba, por demostrarme el gran amor que me tienen y por siempre estar a mi lado. Lo que soy como persona es gracias a su ustedes y su crianza y me enorgullezco de eso. También a mis hermanas Yenifer y Constanza que las quiero inmensamente, por estar conmigo siempre, pasar hermosos momentos, reírnos, apoyarme y ser grandes amigas para mí. A toda mi familia los amo con todo mi corazón.

No puedo dejar de agradecer a un grupo de amigos que fueron muy importantes para mí en mi estadía en Concepción, el Hogar Universitario Adventista de Concepción (HUAC). Gracias a ellos encontré aquí mi segundo hogar, siempre me sentí apoyada y querida por ellos, era como estar en casa. Pase hermosos momentos de almuerzos de sábado, actividades, cumpleaños y muchas otras cosas que guardare en mi corazón, gracias por hacerme feliz y sonreír siempre. Ustedes fueron el apoyo para poder sobrevivir en la Universidad. Si estoy triste, es por dejarlos ir. Muchas pero muchas gracias a mi HUAC querido, los quiero a todos.

También agradecer a mis amigos Felipe y Cristian, gracias por ayudarme en la Universidad, hacer los trabajos conmigo y soportarme. Siempre me trataron bien y me sentí cuidada y apoyada por ustedes, de verdad si logre pasar hormigón y otros ramos fueron gracias a su apoyo y comprensión, muchas gracias y los extrañaré.

Y finalmente agradecer al profesor Patricio Álvarez por haberme dado un tema de tesis y ayudarme en su desarrollo, gracias también por los conocimientos aprendidos.

NOMENCLATURA

D.E: Desviación estándar.

FHWA: Federal Highway Administration.

HCHRP: National Cooperative Highway Research Program.

HCM: Highway Capacity Manual.

M.C. V3: Manual de Carreteras, Volumen 3.

NS: Nivel de servicio.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.1.- Objetivos. | 6 |
| 1.1.1.- Objetivo General. | 6 |
| 1.1.2.- Objetivos Específicos | 6 |
| CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 7 |
| 2.1.- Características geométricas de una rotonda. | 7 |
| 2.2.- Características generales de una rotonda. | 8 |
| 2.2.1.- Seguridad | 8 |
| 2.2.2.- Decisiones del usuario | 9 |
| 2.3.- Modelo de aceptación de brecha | 10 |
| 2.4.- Rendimiento operacional de una rotonda..... | 11 |
| 2.4.1.- Efecto de la corriente de tránsito y el comportamiento del conductor | 11 |
| 2.4.2.- Efecto de la geometría | 12 |
| 2.4.3.- Capacidad..... | 12 |
| 2.4.4.- Control de retardo o demora | 13 |
| CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA | 15 |
| 3.1.- Problemática..... | 15 |
| 3.2.- Secuencia de actividades | 15 |
| 3.3.- Geometría de la rotonda | 16 |
| 3.4.- Definición umbrales de demanda asimétrica y movimientos..... | 17 |
| 3.5.- Análisis mediante SIDRA INTERSECTION | 20 |
| 3.5.1.- Análisis rotonda | 20 |
| 3.5.2.- Análisis intersección semaforizada..... | 20 |
| 3.6.- Resultados análisis SIDRA INTERSECTION..... | 22 |
| 3.7.- Análisis rotonda..... | 22 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 3.8.- | Análisis intersección semaforizada | 23 |
| 3.9.- | Comparación resultados rotonda v/s intersección semaforizada | 23 |
| 3.10.- | Simulación con AIMSUN | 26 |
| 3.7.1.- | Simulación rotonda | 26 |
| 3.7.2.- | Simulación intersección semaforizada..... | 26 |
| 3.11.- | Resultados Simulación en AIMSUN | 27 |
| 3.8.1.- | Simulación rotonda | 27 |
| 3.8.2.- | Simulación intersección semaforizada..... | 27 |
| 3.8.3.- | Comparación resultados rotonda v/s intersección semaforizada | 28 |
| 3.12.- | Análisis rotonda semaforizada SIDRA INTERSECTION..... | 31 |
| CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ROTONDA GENERAL BONILLA | | 33 |
| 4.1.- | Análisis rotonda General Bonilla | 34 |
| 4.2.- | Resultados análisis | 35 |
| 4.3.1.- | Resultados rotonda Bonilla en SIDRA | 35 |
| 4.3.2.- | Resultados rotonda Bonilla en AIMSUN | 35 |
| 4.3.- | Implementación de semaforización en rotonda Bonilla..... | 35 |
| 4.3.1.- | Resultados semaforización | 36 |
| CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | 37 |
| BIBLIOGRAFIA | | 39 |
| ANEXOS | | 41 |
| ANEXO A: ESTIMACIÓN DE DISEÑO, CAPACIDAD Y DEMORA EN ROTONDAS | | 42 |
| ANEXO B: MODELOS MICROSCÓPICOS | | 48 |
| ANEXO C: RESULTADOS OBTENIDOS EN SIDRA INTERSECTION..... | | 64 |
| ANEXO D: RESULTADOS OBTENIDOS EN AIMSUN | | 78 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Caso demanda asimétrica punta mañana en rotonda Bonilla..... | 4 |
| Figura 2. Componentes de una rotonda..... | 8 |
| Figura 3. Metodología | 16 |
| Figura 4. Definición de Demanda Asimétrica Caso 1, 400 veh/hr..... | 18 |
| Figura 5. Simulación Intersección SemafORIZADA | 21 |
| Figura 6. Giro derecha rotonda v/s intersección semafORIZADA con 400 veh/hr, SIDRA | 24 |
| Figura 7. Sigue directo rotonda v/s intersección semafORIZADA con 400 veh/hr, SIDRA | 24 |
| Figura 8. Giro izquierda rotonda v/s intersección semafORIZADA con 400 veh/hr, SIDRA | 25 |
| Figura 9. Giro en U rotonda v/s intersección semafORIZADA con 400 veh/hr, SIDRA | 25 |
| Figura 10. Giro derecha rotonda v/s intersección semafORIZADA con 400 veh/hr, AIMSUN..... | 28 |
| Figura 11. Sigue directo rotonda v/s intersección semafORIZADA con 400 veh/hr, AIMSUN | 29 |
| Figura 12. Giro izquierda rotonda v/s intersección semafORIZADA con 400 veh/hr, AIMSUN | 29 |
| Figura 13. Giro en U rotonda v/s intersección semafORIZADA con 400 veh/hr, AIMSUN | 30 |
| Figura 14. Rotonda SemafORIZADA SIDRA INTERSECTION..... | 31 |
| Figura 15. Flujos generados en Rotonda General Bonilla..... | 33 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Demanda Asimétrica Aplicada..... | 18 |
| Tabla 2. Ejemplo Modelación Caso 1, 400 veh/hr | 19 |
| Tabla 3. Demora Rotonda para el Caso 1 y D= 40 m..... | 22 |
| Tabla 4. Demora Intersección SemafORIZADA para el Caso 1 | 23 |
| Tabla 5. Rotonda en AIMSUN con 400 veh/hr en Accesos Simétricos | 27 |
| Tabla 6. Cola Virtual Máxima Intersección SemafORIZADA con 400 veh/hr en Accesos Simétricos | 27 |
| Tabla 7. Rotonda con Semáforo, 400 veh/hr en Accesos Simétricos..... | 32 |
| Tabla 8. Flujos generados en Rotonda Bonilla..... | 34 |

EFFECTO DE LA DEMANDA ASIMÉTRICA EN EL NIVEL DE SERVICIO DE ROTONDAS URBANAS.

MARÍA PAZ SIEGEL SEPÚLVEDA

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
msiegel@alumnos.ubiobio.cl

PATRICIO ÁLVAREZ MENDOZA. Ph.D.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
palvarez@ubiobio.cl

RESUMEN

Las rotondas son una forma de intersección circular que asigna prioridad al tráfico que circula alrededor de una isla central, permitiendo que los vehículos entren sin parar cuando las brechas están disponibles, siendo más seguras y efectivas que una intersección normal. Sin embargo en ciertas horas del día algunas rotondas no funcionan de manera eficiente debido a la presencia de demandas asimétricas en sus accesos, provocando demoras en el acceso más saturado, afectando el nivel de servicio en los otros accesos a la rotonda.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento de las rotondas bajo condiciones de demanda y se estima el nivel de servicio que se experimenta en los diferentes accesos. Para ello se consideró el estudio de una rotonda de prueba sometida a diferentes demandas, determinando la demora generada y el nivel de servicio, permitiendo estimar los umbrales que la hacen más ineficiente frente a una intersección semaforizada en esta situación.

Los resultados indican que, a medida que aumenta el diámetro inscrito en la rotonda, la demora suele disminuir, las maniobras giro a la izquierda y giro en U, son los movimientos más invasivos y generan altas demoras. La implementación de un sistema de control auxiliar en uno de los accesos de la rotonda beneficia los movimientos producidos y disminuye la demora.

Palabras Claves: rotonda, nivel de servicio, demanda asimétrica, SIDRA, AIMSUN

4208 Palabras Texto + 23 Figuras/Tablas*250 = 9958 Palabras Totales

**EFFECT OF THE DEMAND ASYMMETRIC IN THE SERVICE LEVEL OF
ROUNABOUTS URBAN.**

MARÍA PAZ SIEGEL SEPÚLVEDA

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
msiegel@alumnos.ubiobio.cl

PATRICIO ÁLVAREZ MENDOZA Ph.D.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
palvarez@ubiobio.cl

ABSTRACT

Roundabouts are a form of circular intersection that assigns priority to traffic travels around a central island, allowing vehicles to enter without stopping when the gaps are available, being safer and more effective than a normal intersection. But at certain times of day some roundabouts do not work efficiently due to the presence of asymmetric demands on their hits, causing delays in the saturated access, affecting the level of service in the other accesses to the roundabout.

In this paper is studied the behavior of roundabouts with demand different conditions and it is estimated the level of service that is experienced in the different approach. For this, it was considered the study of a roundabout of test under different demands, determining the delay generated and the service level, allowing to estimate the thresholds that make it more inefficient compared to a signalized intersection in this situation.

The results indicate that, as it increases the diameter of the roundabout, the delay often decreases, the maneuvers left turn and U-turn, the movements are more invasive and generate high delays. The implementation of a system of auxiliary control in one of the accesses to the roundabout benefits the movements produced and decreases the delay.

Keywords: roundabout, service level, asymmetric demand, SIDRA, AIMSUN

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Una rotonda es una forma de intersección circular en donde el tráfico gira en una sola dirección, alrededor de una isla central y mediante la cual el flujo que entra debe ceder el paso al tráfico circulante en esta (NCHRP Report 672).

Las rotondas han sido ampliamente estudiadas y entre sus beneficios se encuentran, mejorar la seguridad, demoras y capacidad, permitiendo reducir los puntos de conflicto de 32 (cruce simple a nivel) a 8 (Sierra, 2001). En particular, la capacidad es uno de los indicadores más efectivos para evaluar el rendimiento de una rotonda. Sin embargo, la medida que sirve para cuantificar el rendimiento percibido por el usuario es el nivel de servicio (N.S), el que caracteriza las condiciones de operación dentro de la corriente de tránsito y su percepción por parte de los conductores y pasajeros, en términos de la velocidad, tiempo de viaje, comodidad del conductor entre otros. En general para poder estimar en una intersección el nivel de servicio se utiliza la demora, definida como el tiempo total transcurrido desde el momento que un vehículo se detiene al final de la cola hasta que este se aleja de la línea de parada, medido en (s/veh).

En la práctica el comportamiento de una rotonda se ve afectado por la distribución de la demanda (esta distribución es asimétrica, donde un acceso está más saturado que el resto) en sus accesos en ciertas horas del día, específicamente la punta mañana y la punta tarde. Un claro ejemplo de esto es lo que ocurre en la punta mañana en la rotonda Bonilla de Concepción, tal como se ve en la Figura 1, donde el acceso Este presenta más demanda que el resto y se producen los movimientos con mayor flujo en la rotonda, condición que genera altas demoras en el acceso saturado, afectando el nivel de servicio percibido por los usuarios en los otros accesos a la rotonda.



Figura 1. Caso demanda asimétrica punta mañana en rotonda Bonilla

(Fuente: Google Earth y elaboración propia)

Este concepto de demanda asimétrica no lo consideran las metodologías de diseño disponibles de rotondas, pero juega un papel fundamental, debido a que provoca que la rotonda funcione de manera ineficiente y no como fue diseñada.

Es por esto que nace el objetivo de analizar el comportamiento de rotondas bajo condiciones de demanda asimétrica. Para ello, se analizó una rotonda de prueba sometida a demanda variable y se determinó la demora generada y el nivel de servicio (N.S), a partir de los softwares SIDRA INTERSECCION 5.1 y AIMSUN. De esta manera se determinaran los umbrales sobre los cuales la rotonda funcionara de manera ineficiente frente a una intersección semaforizada sometida a la misma demanda. Así, a partir de los umbrales obtenidos se ejecutará la implementación de un sistema de control auxiliar en uno de los accesos, que permitirá mejorar el comportamiento de la rotonda (disminución de la demora). Finalmente se realizará el caso de estudio de la rotonda Bonilla de Concepción la cual experimenta demanda asimétrica, determinando la demora e implementado un sistema de control auxiliar para mejorar esta situación.

De esta forma la estructura del estudio realizado contendrá los siguientes capítulos:

Capítulo 1, Introducción: Este capítulo es el que se presentó anteriormente y nos da una introducción del estudio realizado y en que consiste.

Capítulo 2, Fundamentos Teóricos: Entrega la síntesis del arte referente a las rotondas, características generales y de operación de esta.

Capítulo 3, Metodología: Se describen los pasos realizados para poder cumplir con los objetivos del estudio y los resultados del caso analizado en este capítulo.

Capítulo 4, Caso Estudio Rotonda General Bonilla: Se analiza la rotonda Bonilla, se implementa un sistema de control y se entregan algunos resultados.

Capítulo 5, Conclusiones y Recomendaciones: En este capítulo se describen las conclusiones del estudio y se dan algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

Anexos: En este ítem se encuentran todos los resultados obtenidos y proporcionan información adicional para detallar ciertos capítulos.

1.1.- Objetivos.

1.1.1.- Objetivo General.

- Analizar rotondas bajo condiciones de demanda asimétrica y la incidencia de estos sobre el nivel de servicio.

1.1.2.- Objetivos Específicos

- Sintetizar el estado de la práctica en la estimación del nivel de servicio de rotondas.
- Definir escenarios de prueba para estudiar el comportamiento de rotondas bajo condiciones de demanda variable.
- Analizar el nivel de servicio de una rotonda, bajo diferentes condiciones de demanda asimétrica por medio de simulación microscópica.
- Establecer umbrales de demanda y número de movimientos críticos a partir de los cuales recomendar la implementación de sistemas de control alternativos.
- Analizar el caso de Rotonda Bonilla.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Las rotondas como se han definido anteriormente son una forma de intersección circular en donde el tráfico gira en una dirección, alrededor de una isla central y mediante la cual el flujo que entra debe ceder el paso al tráfico circulante en esta.

El concepto fue introducido por primera vez a principios de 1900 y se desplegó a lo largo de Europa y América. En los EE.UU., la primera guía de diseño para una rotonda fue publicada en 1942 por la American Association of State Highway Officials (AASHO) (Wang y Yang, 2012).

2.1.- Características geométricas de una rotonda.

La rotonda moderna (conocida ahora simplemente como rotonda) fue desarrollada en el Reino Unido en la década de 1960 implementando la regla de dar el paso al flujo circulante, todo esto para rectificar los problemas asociados a los círculos de tráfico empleados antiguamente como una solución de intersección, cuya experiencia a nivel internacional era negativa, provocando el aumento de los volúmenes de tráfico (NCHRP Report 572, 2000).

La rotonda moderna representa una mejora significativa, tanto en términos de operaciones y de seguridad. Por esta razón, muchos países han adoptado la rotonda como una forma de intersección común, y algunos han desarrollado amplias guías de diseño y métodos para evaluar el funcionamiento y comportamiento de estas (NCHRP Report 672, 2010).

La descripción de las características fundamentales de una rotonda se encuentran mostradas en la Figura 2 a continuación.

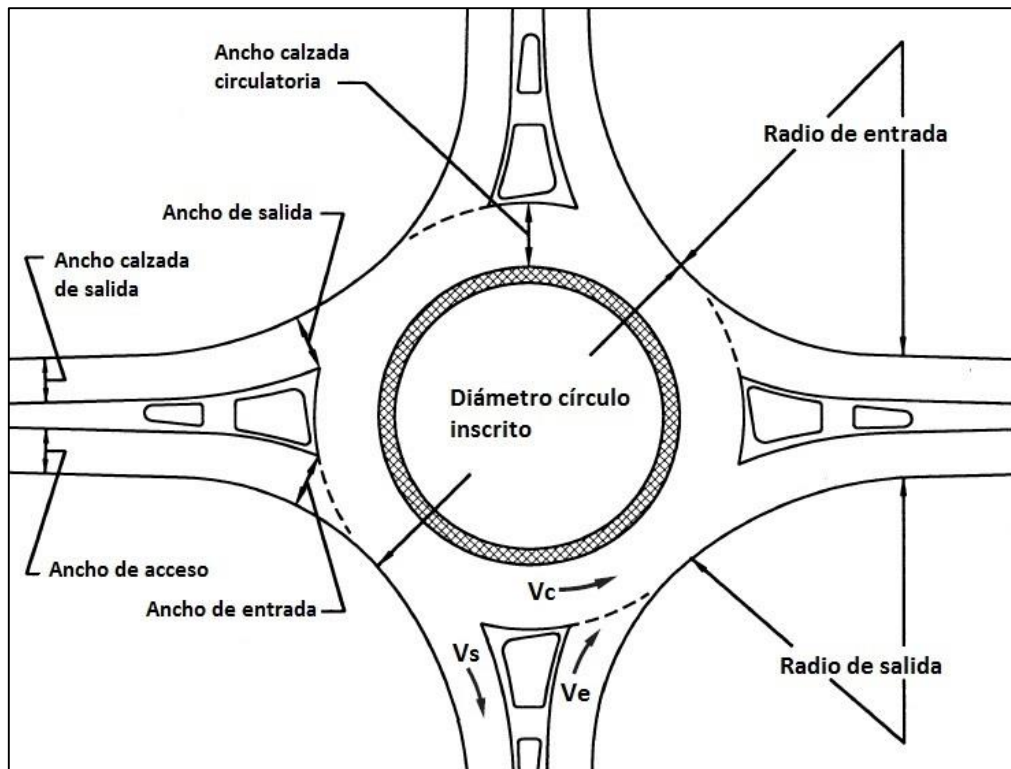


Figura 2. Componentes de una rotonda

(Fuente: NCHRP Report 672)

Nota: V_c = volumen de circulación
 V_e = volumen de entrada
 V_s = volumen de salida

El número de pistas de entrada en los accesos de una rotonda se diseñan en función de los volúmenes de tráfico que circularan por esta (volumen de entrada + volumen circulación).

El NCHRP Report 672 y el M.C. V3 recomiendan algunas dimensiones óptimas de los parámetros geométricos de diseño de una rotonda, los cuales se encuentran definidos en el Anexo A.

2.2.- Características generales de una rotonda.

Las rotondas son utilizadas como una solución para las intersecciones a nivel, sin embargo, el funcionamiento y ejecución de las maniobras en ella depende de varios factores, entre los que destacan:

2.2.1.- Seguridad

Las rotondas han demostrado ser más seguras que otras formas de intersecciones. El desempeño de seguridad de esta es producto de su diseño, en ellas los vehículos viajan en la misma dirección, eliminando los ángulos rectos y giros a la izquierda que son tan conflictivos en intersecciones tradicionales. Además debido a su diseño, la rotonda pone una alta prioridad en el control de la

velocidad debido a que los vehículos ejecutan una serie de maniobras de giro a través de la rotonda a bajas velocidades, por lo general menos de 30 km/h (FHWA, 2000).

Algunos de los beneficios de seguridad que entrega son:

- Proporcionar más tiempo para juzgar la entrada de los conductores, ajustar su velocidad y entrar en un espacio en el tráfico que circula que le permita realizar movimientos de forma más seguras.
- Reducir el tamaño de los triángulos de visibilidad necesarios para que los conductores puedan verse entre ellos.
- Proporcionar más tiempo para que todos los usuarios detecten y corrijan sus errores.
- Generar accidentes menos frecuentes y menos graves, incluyendo accidentes que involucran peatones y ciclistas.
- Hacer la intersección más segura para los usuarios sin experiencia.

2.2.2.- *Decisiones del usuario*

La correcta ejecución de las maniobras en la rotonda, así como la seguridad que entrega frente a otras intersecciones dependerá de las decisiones de los usuarios, es decir, las decisiones de los conductores, peatones y ciclistas. Sin embargo, las rotondas generan más confianza en la toma de decisiones en las personas que en otra intersección.

Los conductores que se aproximan a una rotonda de una sola pista tienen dos decisiones básicas en relación con otros usuarios: seleccionar la pista apropiada según su destino, y dar el derecho de paso. Realizar la circulación en las rotondas es generalmente más compleja que para otros tipos de intersección, principalmente debido a que el conductor no siempre puede ver la salida y el hecho de que la intersección sea curvada obliga a los conductores a cambiar gradualmente de dirección, desorientado al conductor en relación a su origen y destino. Como consecuencia el diseño debe proporcionar una guía adicional en forma de signos y marcas para ayudar en la navegación del conductor (NCHRP Report 672, 2010).

2.3.- Modelo de aceptación de brecha

En un modelo de aceptación de brecha, el conductor de la corriente menor (ingresar) requiere un espacio aceptable en la corriente principal (circulante), para ingresar y llevar a cabo la maniobra deseada. La operación del tráfico de vehículos en una rotonda está determinada por el concepto de *aceptación de brecha* o “*brecha crítica*”, t_c , que se define como el intervalo de tiempo mínimo en el tráfico de la calle principal que permite la entrada de un vehículo de la calle de menor importancia, es decir, los vehículos que entran buscan y aceptan las brechas en el tráfico que circula (FHWA, 2000). De esta manera, para el conductor la brecha crítica es el espacio mínimo aceptable. Así, un conductor particular, rechazara cualquier espacio menor que la brecha crítica y aceptara brechas mayores o iguales a esta.

La brecha crítica no es una constante y por lo general está representada por una distribución de valores basados en la variación de comportamiento del conductor.

Las bajas velocidades de una rotonda facilitan este proceso de aceptación de la brecha. Además, la eficiencia operativa (capacidad) de las rotondas es mayor a menor velocidad de circulación a causa de los dos fenómenos siguientes:

1. Cuanto más rápido el tráfico que circula, mayor deberá ser el espacio en el tráfico que entra para que este circule cómodamente. Esto se traduce en menos huecos o espacios aceptables y por lo tanto, más casos de vehículos que entran parados en la línea de producción.
2. El tráfico que quiere introducirse y que está detenido primero en la línea de producción, requiere brechas aún más grandes en el tráfico que circula a fin de acelerar y fusionarse con este (NCHRP Report 672, 2010).

Adicionalmente el “*tiempo de seguimiento*”, t_f , se define como el tiempo de avance entre dos vehículos que entran de forma consecutiva, utilizando la misma brecha.

- Cuando la brecha después del último vehículo en el bloque (vehículos agrupados, separados por un espacio mínimo) es igual o mayor que el avance crítico, los vehículos son capaces de entrar en el flujo de la corriente principal.
- Los vehículos pueden entrar cuando existen brechas grandes con un tiempo de seguimiento de t_f .

Estos dos conceptos, brecha y tiempo de seguimiento, son muy importantes al momento de calcular la capacidad de una rotonda y proporcionan una indicación del comportamiento del conductor a un acceso dado. Factores tales como la presencia de vehículos pesados afectan a estos parámetros (NCHRP Report 572, 2000).

2.4.- Rendimiento operacional de una rotonda

2.4.1.- Efecto de la corriente de tránsito y el comportamiento del conductor

La capacidad de entrada de una rotonda disminuye a medida que aumenta el flujo en conflicto. En general, el flujo principal en conflicto es el flujo circulante que pasa directamente en frente de la entrada del acceso. Cuando el flujo en conflicto se aproxima a cero, el flujo máximo de entrada está dado por 3,600 segundos por hora dividido por el tiempo de seguimiento.

Variaciones de las condiciones de la vida real pueden ocurrir que afectan el rendimiento operacional de las rotondas, algunas de estas son (HCM, 2010):

- *Efecto de los vehículos que salen:* Mientras que el flujo circulante entra directamente en conflicto con el flujo de entrada, el caudal de salida también puede afectar a la decisión de un conductor sobre cuando entrar a la rotonda.
- *Cambios en la prioridad efectiva:* Cuando los volúmenes del flujo de entrada y conflictivo son altos, la prioridad limitada (donde el tráfico que circula ajusta sus intervalos para permitir que entren los vehículos) se revierte (ahora el tránsito entra a la fuerza y obliga al tráfico que circulan a ceder), así, el modelo de aceptación de brecha no puede dar resultados confiables.
- *Limitación de la capacidad:* Cuando un acceso opera sobre la capacidad durante el período de análisis, una condición conocida como restricción de la capacidad puede ocurrir. Durante esta condición, el flujo de circulación real aguas abajo de la entrada restringida será menor que la demanda. La reducción del actual flujo de circulación puede, por tanto, aumentar la capacidad de los afectados en la entrada aguas abajo.

2.4.2.- Efecto de la geometría

La geometría juega un papel significativo en el rendimiento operativo de una rotonda:

- Afecta a la velocidad de los vehículos a través de la intersección, influyendo así en su tiempo de viaje en virtud de la geometría por sí sola (retardo geométrica).
- Determina el número de carriles de los accesos y de circulación sobre los que viajan los vehículos y los anchos de la calzada.
- Puede afectar el grado en que el flujo de un determinado carril está limitado. Por ejemplo, el ángulo de entrada de un vehículo puede afectar a la velocidad de ese vehículo. Cuando las entradas que son más perpendiculares, se requieren velocidades más bajas. Asimismo, la geometría de los carriles de entrada pueden influir en el grado en que los conductores están entrando uno junto al otro.
- Puede afectar a la percepción del conductor de cómo navegar por la rotonda y su elección de carril correspondiente al acercarse a la entrada.

Así, los elementos geométricos de una rotonda, junto con el volumen del tráfico pueden determinar la eficiencia con la que opera una rotonda (NCHRP Report 672, 2010).

2.4.3.- Capacidad

El HCM define la capacidad como "el máximo volumen horario equivalente (C) que tiene una razonable probabilidad de pasar por un punto o una sección uniforme de una pista o una calzada, durante un período de tiempo, bajo las condiciones prevalecientes de la calzada, tránsito y control". La capacidad de un carril de entrada de una rotonda depende de la cantidad de tráfico en conflicto (vehículos que viajan a lo largo de la calzada circulatoria) que está presente en cada acceso. Cuando baja el volumen de tráfico en conflicto, el enfoque del acceso tendrá una capacidad superior y a su vez permitir un mayor número de vehículos para entrar en la rotonda.

Existen diversos métodos para determinar la capacidad, los cuales consideran el comportamiento del conductor (tiempo de seguimiento y brecha) o los parámetros geométricos para determinarla.

Algunos de estos son:

- HCM 2010
- Reino Unido (el M.C V3 utiliza este método)
- Alemania

El detalle de cada uno de estos métodos se encuentran definidos en el Anexo A del presente informe.

2.4.4.- *Control de retardo o demora*

El control de retardo o “*demora*” es la medida de eficacia que se utiliza para definir el nivel de servicio en las intersecciones, según la percepción de los usuarios. El retardo experimentado por un automovilista depende de un número de factores como el control, geometría, tráfico y los incidentes. La demora total es la diferencia entre el tiempo de viaje real vivido y el tiempo de referencia que resultaría en condiciones base: ausencia de control de tráfico, retraso geométrico, incidentes, y cualquier otro vehículo presente.

El retardo de control o demora se define como el tiempo total transcurrido desde el momento que un vehículo se detiene al final de la cola hasta que este se aleja de la línea de parada. Se mide en (s/veh) y en el Anexo A se encuentra la forma en que lo determina el HCM 2010. Adicionalmente se muestra la determinación de la *longitud de la cola*, otra variable para representar la demora, mediada en (veh).

2.4.5.- *Nivel de servicio*

Si bien la capacidad es una medida específica que puede ser definida y estimada, el nivel de servicio (LOS) es una medida cualitativa que "caracteriza a las condiciones operativas dentro de un flujo de tráfico y su percepción por parte de los conductores y pasajeros, en términos de las medidas de servicio como la velocidad, tiempo de viaje, libertad para maniobrar, interrupciones del flujo vehicular y la comodidad del conductor". Para cuantificar el nivel de servicio, la HCM define medidas específicas de eficacia para cada tipo de instalación de la carretera.

El Nivel de servicio para intersecciones señalizadas y rotondas se define en términos del control de retardo o demora, que es una medida de la incomodidad del conductor, la frustración, el consumo de combustible, y el aumento del tiempo de viaje

En concreto, los criterios de Nivel de Servicio están expresadas para un período de análisis de 15 min (HCM, 2000). Los N.S se definen cualitativamente utilizando las nomenclaturas A, B, C, D, E y F cuya clasificación dependerá de la demora (s/veh) percibida por vehículo en el acceso analizado. Sin embargo las rotondas no poseen umbrales para determinar el N.S, es por ello que el NCHRP 572 recomienda para la estimación del N.S de rotondas usar los umbrales utilizados para intersecciones no semaforizada ya que estas son las que mejor favorecen, en cambio SIDRA recomienda usar los umbrales de intersecciones semaforizadas. Ambos umbrales se muestran en la Anexo A, sección A.7.

En resumen, el comportamiento operacional de una rotonda depende exclusivamente de, la relación volumen/capacidad, la demora (s/veh) y longitud de la cola generada en los accesos y el nivel de servicio experimentado por él usuario.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1.- Problemática

Las rotondas suelen ser una buena alternativa para intersecciones no reguladas debido a que reducen los puntos de conflicto y la velocidad de circulación gracias al diseño geométrico. Además sirven para mejorar el control de demora generado en todas las direcciones, porque asigna prioridad al tráfico que circula, permitiendo que los vehículos entren sin parar cuando las brechas están disponibles. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, en ciertos horarios del día las rotondas se ven afectadas por la presencia de demanda asimétrica, generando un funcionamiento ineficiente y que afecta directamente al conductor.

Por esto, en el presente capítulo, se describe en detalle la metodología realizada para llevar a cabo el análisis del nivel de servicio de las rotondas sometidas a demanda asimétrica y determinar los umbrales de ineficiencia.

3.2.- Secuencia de actividades

Para poder realizar la investigación y cumplir con los objetivos fueron necesarios realizar las secuencias de actividades descritas en la Figura 2 a continuación:

| | |
|--|---|
| <p>Definición geometría rotonda de prueba</p> | <p>Aquí se especificará la geometría de la rotonda de prueba utilizada para analizar la demanda asimétrica e implementada en el desarrollo de las simulaciones.</p> |
| <p>Definición de los umbrales de demanda asimétrica y movimientos</p> | <p>Para poder representar la demanda asimétrica en la rotonda de prueba se definirán los valores de demanda y los movimientos implementados en la rotonda.</p> |
| <p>Análisis rotonda mediante SIDRA</p> | <p>A partir de la rotonda de prueba, se obtendrá la demora y el N.S para cada uno de los casos analizados mediante el modelo analítico de SIDRA. Adicionalmente se analizara una intersección semaforizada bajo las mismas condiciones, permitiendo comparar la demora en la rotonda v/s la demora de la intersección y estimar los umbrales de funcionamiento ineficiente.</p> |
| <p>Análisis rotonda mediante AIMSUN</p> | <p>El mismo procedimiento realizado en SIDRA se efectuara en AIMSUN, permitiendo verificar los umbrales obtenidos en SIDRA y realizar un análisis vehículo a vehículo.</p> |
| <p>Implementación de semaforización en rotonda</p> | <p>Se implementará un sistema de control (mediante SIDRA) en uno de los accesos de la rotonda de prueba, analizando el efecto de esto en la demora de la rotonda.</p> |
| <p>Análisis caso rotonda Bonilla</p> | <p>Se analizará el caso punta mañana generado en la rotonda Bonilla, el cual presenta demanda asimétrica.</p> |

Figura 3. Metodología

(Fuente: SIDRA, Elaboración Propia)

3.3.- Geometría de la rotonda

La rotonda de prueba utilizada para realizar la investigación corresponde una rotonda de 4 accesos, dos pistas por calzada y dos pistas circulantes. Además, el análisis se realizó para diferentes valores de diámetro inscrito, permitiendo ver la incidencia de este en la demora genera.

Los valores geométricos de diseño utilizados en la rotonda fueron definidos a partir de las recomendaciones dadas por el NCHRP Report 672 para rotonda con 2 pistas por acceso. Estos valores son:

- Velocidad diseño de entrada deseable (km/h) = 40
- Diámetro inscrito (m) = 40-50-60-80

- Angulo de entrada ($^{\circ}$) = 30
- Radio de entrada (m) = 20
- Radio de salida (m) = 30
- N° pistas por acceso (entrada) = 2
- Ancho entrada (m) = 4
- N° pistas circulantes = 2
- Ancho pista circulatoria (m) = 4,6
- Mediana = No

El análisis en SIDRA INTERSECTION se realizó a rotondas con diámetros inscritos de 40-50-60 y 80 m, mientras que, para AIMSUN se utilizaron diámetros inscritos de 40 y 60 m.

3.4.- Definición umbrales de demanda asimétrica y movimientos

La demanda asimétrica se produce cuando un acceso posee más demanda que el resto, afectando a toda la intersección. Para poder representar este tipo de demanda se eligieron 3 accesos, los cuales fueron sometidos a la misma demanda, mientras que el otro acceso se le aplicó un flujo mayor, tal como se ve en la Figura 4.

De esta forma, la demanda asimétrica utilizada en esta investigación se encuentra definida en la Tabla 1, cuyos valores considerados se basaron en los flujos mínimos y máximos que experimenta una rotonda de 2 pistas según el NCHRP 672 y a partir de algunas simulaciones previas, cuyos resultados representarían de mejor forma la demora y la variación de esta para diferentes demandas.

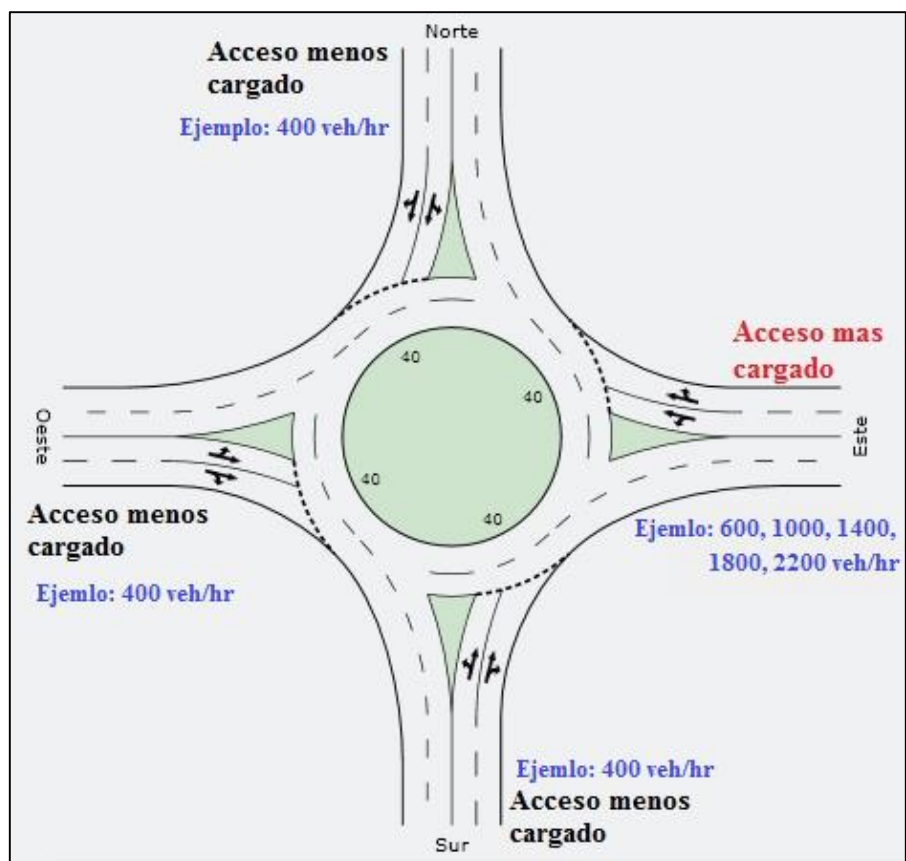


Figura 4. Definición de Demanda Asimétrica Caso 1, 400 veh/hr

(Fuente: SIDRA, Elaboración Propia)

Tabla 1. Demanda Asimétrica Aplicada

| Tipo de demanda | Demanda simétrica accesos Norte, Oeste y Sur (veh/hr) | | | |
|-----------------------------|---|--------|--------|--------|
| | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 |
| | 400 | 600 | 800 | 1200 |
| Demanda acceso Este (veh/h) | | | | |
| A | 600 | 600 | 800 | 1200 |
| B | 1000 | 1000 | 1000 | 1400 |
| C | 1400 | 1400 | 1400 | 1600 |
| D | 1800 | 1800 | 1800 | 1800 |
| E | 2200 | 2200 | 2200 | 2200 |

(Fuente: Elaboración propia)

Para la determinación de la demanda mostrada en la Tabla 1 se definieron los siguientes parámetros:

- *Accesos Simétricos:* Accesos Norte, Oeste y Sur con igual demanda.
- *Acceso más cargado:* Acceso Este, cuya demanda aumenta desde 600, 800 o 1200 veh/hr hasta llegar a los 2200 veh/hr para cada caso de análisis.
- Definición de 4 casos de análisis para la demanda en los accesos simétricos. *Caso 1* (400 veh/hr), *Caso 2* (600 veh/hr), *Caso 3* (800 veh/hr) y *Caso 4* (1200 veh/hr), tal como se ve en la Tabla 1. En la Figura 3 mostrada anteriormente se ve un ejemplo de la demanda para el caso 1.

Adicionalmente cada caso (1, 2, 3 y 4) se analizó considerando que todos los vehículos en cada acceso realizaban la misma maniobra, definiéndose 4 tipos de movimientos: Giro a la derecha (mov. 1), sigue directo (mov. 2), giro a la izquierda (mov. 3) y giro en U (mov. 4).

De esta forma se definió una matriz de 4x4 para realizar la simulación en cada caso, tal como se ve el ejemplo en la Tabla 2 para el caso 1 (400 veh/hr), mediante la cual se puede apreciar que, la abscisa representa la demanda del acceso más cargado (A, B C, D y E) definidos en la Tabla 1 para el caso de 400 veh/hr y la ordenada, el tipo de movimiento producido en la rotonda (1, 2, 3 y 4) respectivamente para cada demanda.

Esta modelación se realizó para los 4 casos (400, 600, 800 y 1200 veh/hr).

Tabla 2. Ejemplo Modelación Caso 1, 400 veh/hr

| Ejemplo Caso 1: 400 veh/hr accesos Norte, Oeste y Sur | | | | | |
|--|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Mov/Demanda (veh/hr) | A (600) | B (1000) | C (1400) | D (1800) | E (2200) |
| 1 (Giro derecha) | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S |
| 2 (Siguiendo directo) | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S |
| 3 (Giro izquierda) | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S |
| 4 (Giro en U) | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S | Demora N.S |

(Fuente: Elaboración propia)

3.5.- Análisis mediante SIDRA INTERSECTION

Para analizar el N.S en la rotonda de prueba bajo las condiciones de demanda descritas anteriormente, será necesario la utilización de SIDRA INTERSECTION, reconocido por el HCM y muchas guías locales en los EE.UU, siendo unos de los software más populares para rotondas en diversas partes del mundo (Akçelik, 2009) y que permitirá obtener la demora en cada uno de los accesos bajo las diferentes condiciones de demanda. Para esto, SIDRA utiliza en su desarrollo el modelo analítico, definido por el HCM como "un modelo que relaciona los componentes del sistema mediante consideraciones teóricas que son validadas y calibradas por los datos de campo", es decir, su modelo utiliza cálculos matemáticos directos para determinar los estados del sistema. De esta manera se obtendrá la demora generada en la rotonda, la cual será comparada con la obtenida en una intersección semaforizada.

3.5.1.- Análisis rotonda

SIDRA permite el análisis de una o varias pistas en la rotonda y ofrece la posibilidad de ingresar las condiciones de tráfico locales, especificar los datos de entrada, geometría, flujos, modelo a utilizar entre otros. De esta forma se definieron los parámetros de entrada utilizados para la simulación de la rotonda de prueba y encontrados en el Manual del usuario de SIDRA, 2012. Por consiguiente, la descripción y los valores de entrada utilizados para la simulación se encuentran definidos en el Anexo B, sección B.1.

3.5.2.- Análisis intersección semaforizada

Para poder analizar el efecto de la demanda asimétrica en el N.S de las rotondas y determinar los umbrales de funcionamiento ineficiente de esta, es necesario hacer una comparación con una intersección semaforizada, también utilizada como solución para las intersecciones a nivel. Para ello, se analizó una intersección semaforizada de 4 accesos y 2 pistas por calzada, tal como se muestra en la Figura 5. La demanda y los movimientos utilizados para la simulación serán los mismos implementados en la rotonda (Tabla 1) y realizado para los 4 casos. Así se obtendrá la demora experimentada en la intersección, la cual será comparada con la obtenida en la rotonda, permitiendo estimar bajo que umbrales la rotonda es menos eficiente y conveniente que la intersección.

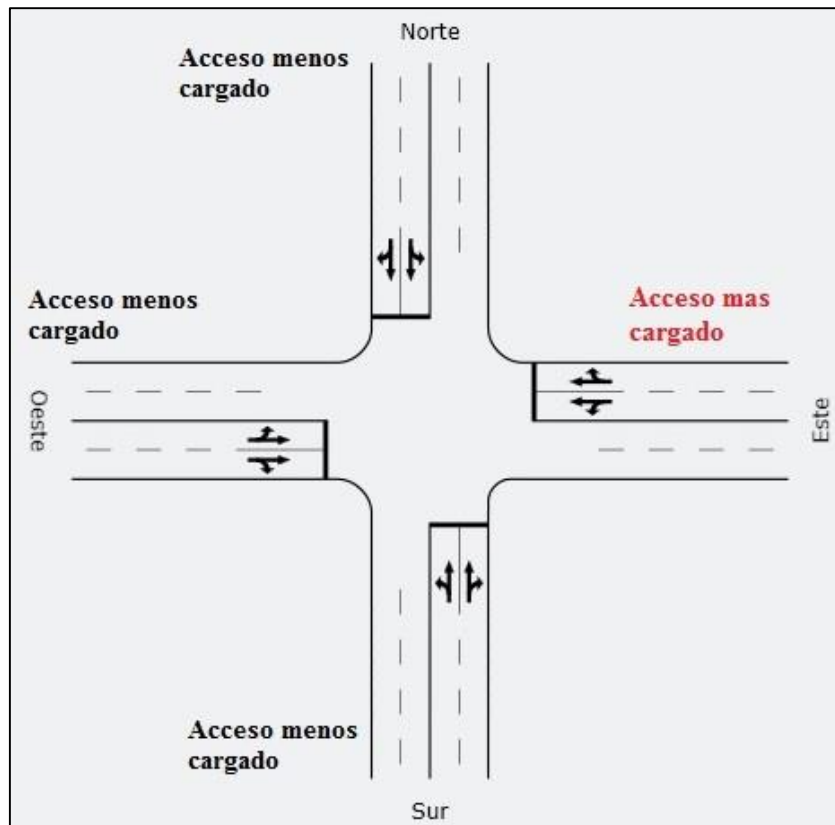


Figura 5. Simulación Intersección Semaforizada

(Fuente: SIDRA INTERSECTION)

Los datos peatonales, de movimiento y volumen utilizados para la intersección fueron los mismos descritos para rotondas. La brecha y el tiempo de seguimiento empleado para la intersección semaforizada se basó en la recomendación del Manual del usuario de SIDRA. El tiempo de ciclo utilizado para cada demanda fue determinado por SIDRA (tiempo de ciclo óptimo) y los valores mínimos (40 s) y máximos (120 s) definidos para determinar el ciclo se fundamentaron en las recomendación del Manual de Señalización, capítulo 4 (Semáforos).

Los valores geométricos utilizados para la intersección se muestran a continuación.

- Ancho pista (m) = 3,5
- Largo pista (m) = 500
- N° pistas por acceso (entrada) = 2
- Mediana = No

3.6.- Resultados análisis SIDRA INTERSECTION

A partir de la metodología descrita anteriormente se procedió a efectuar el estudio de la rotonda de prueba. El análisis de la demora y el N.S obtenido se realizarán para el caso 1, 400 veh/hr en los accesos simétricos, cuyos resultados (gráficos y tablas mostradas a continuación) permiten percibir de mejor forma los umbrales obtenidos. Para los otros casos (2, 3 y 4), los resultados se presentan en el Anexo C.

3.7.- Análisis rotonda

La simulación se realizó a una rotonda de 4 accesos cuya demanda y movimientos implementados fueron los descritos anteriormente. La modelación para cada caso analizado se efectuó para los diámetros inscritos de 40, 50, 60 y 80 m. La Tabla 3 presentada a continuación muestra la demora (s/veh) y el N.S en función del aumento de la demanda en el acceso más cargado (A, B, C y D) para el caso 1, 400 veh/hr en los accesos simétricos y diámetro inscrito de 40 m.

Tabla 3. Demora Rotonda para el Caso 1 y D= 40 m

| Rotonda D= 40 m | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A |
| 2 | 7,5 A | 8,5 A | 11,2 B | 30,9 C | 88,7 F |
| 3 | 15,1 B | 18,1 B | 42,8 D | 122,1 F | 214,0 F |
| 4 | 20,2 C | 29,8 C | 96,6 E | 200,8 F | 319,8 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Los valores en rojos mostrados en la Tabla 3 resultan de la comparación de la rotonda versus la intersección semaforizada y representan aquellas demoras superiores a las demoras generados en una intersección semaforizada sometida a las mismas condiciones de movimiento y demanda, tal como se definió anteriormente.

3.8.- Análisis intersección semaforizada

La intersección semaforizada utilizada para el estudio posee 4 accesos, sometidos a la misma demanda y movimientos implementados en la rotonda. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos en la intersección para el caso 1. Los demás resultados se encuentran en el Anexo C, sección C.2.

Tabla 4. Demora Intersección Semaforizada para el Caso 1

| Intersección semaforizada (SIDRA) | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 13,8 B | 16,0 B | 19,9 B | 24,5 C | 36,1 D |
| 2 | 9,3 A | 10,1 B | 11,8 B | 14,3 B | 18,4 B |
| 3 | 35,1 D | 44,5 D | 58,8 E | 82,8 F | 124,1 F |
| 4 | 45,0 D | 54,3 D | 68,6 E | 92,4 F | 133,6 F |

(Fuente: Elaboración propia)

3.9.- Comparación resultados rotonda v/s intersección semaforizada

Una vez obtenidos los resultados de la demora para la rotonda y la intersección semaforizada del caso análisis (400 veh/hr en los accesos simétricos) se procedió a realizar una comparación y determinar el umbral de demanda donde la rotonda funciona de forma ineficiente respecto de la intersección (valores en rojo de la Tabla 3).

La comparación de las rotondas (diferente diámetro inscrito) y la intersección semaforizada, para cada movimiento definido (giro derecha, sigue directo, giro izquierda y giro en U) se puede ver en las Figuras 6, 7, 8 y 9 respectivamente para el caso 1. Adicionalmente en cada uno de los gráficos se puede visualizar las zonas de eficiencia e ineficiencia de las rotondas.

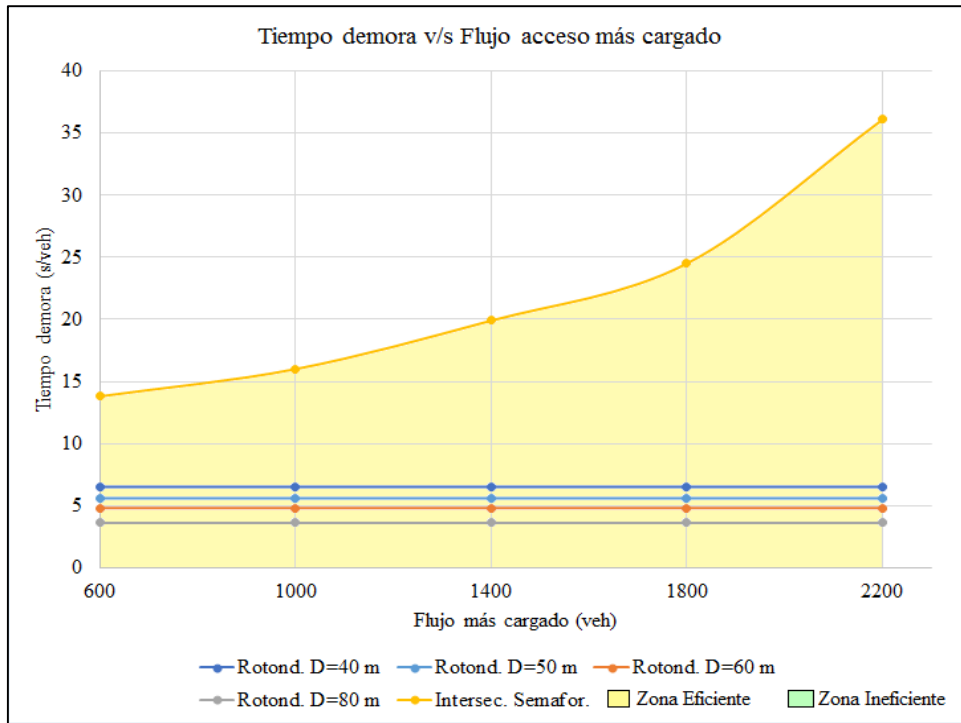


Figura 6. Giro derecha rotonda v/s intersección semaforizada con 400 veh/hr, SIDRA

(Fuente: Elaboración propia)

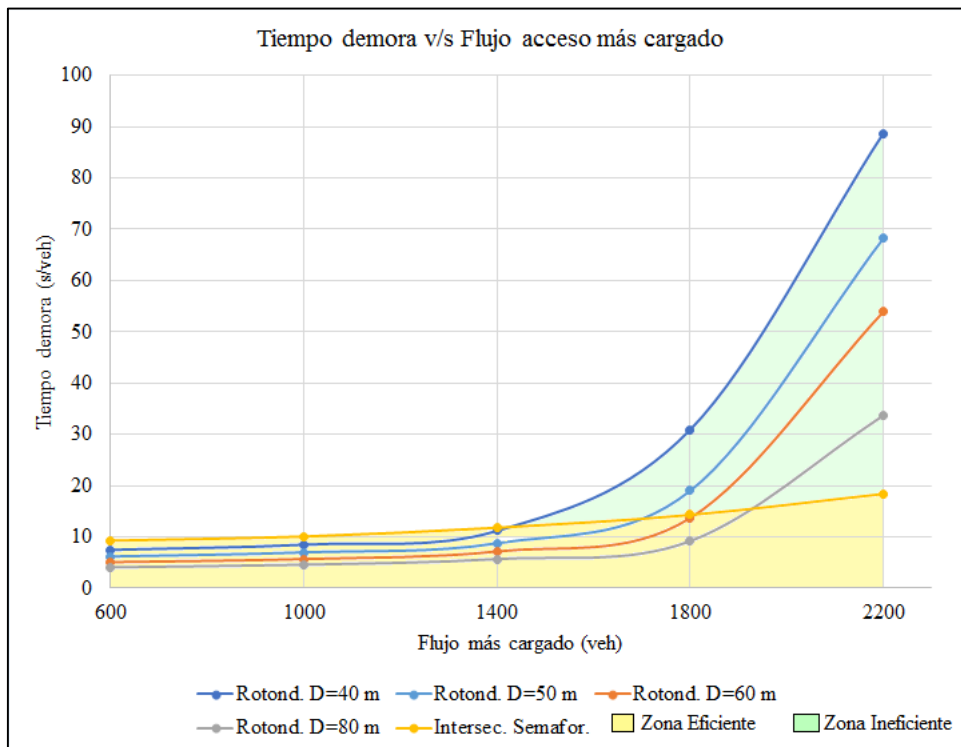


Figura 7. Sigue directo rotonda v/s intersección semaforizada con 400 veh/hr, SIDRA

(Fuente: Elaboración propia)

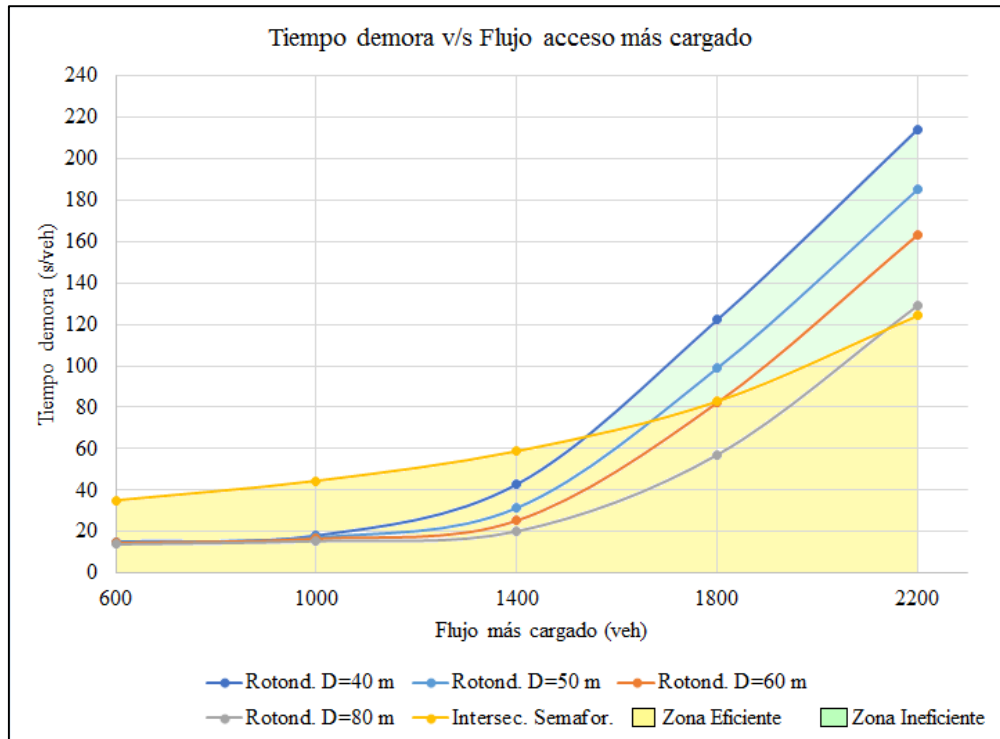


Figura 8. Giro izquierda rotonda v/s intersección semaforizada con 400 veh/hr, SIDRA

(Fuente: Elaboración propia)

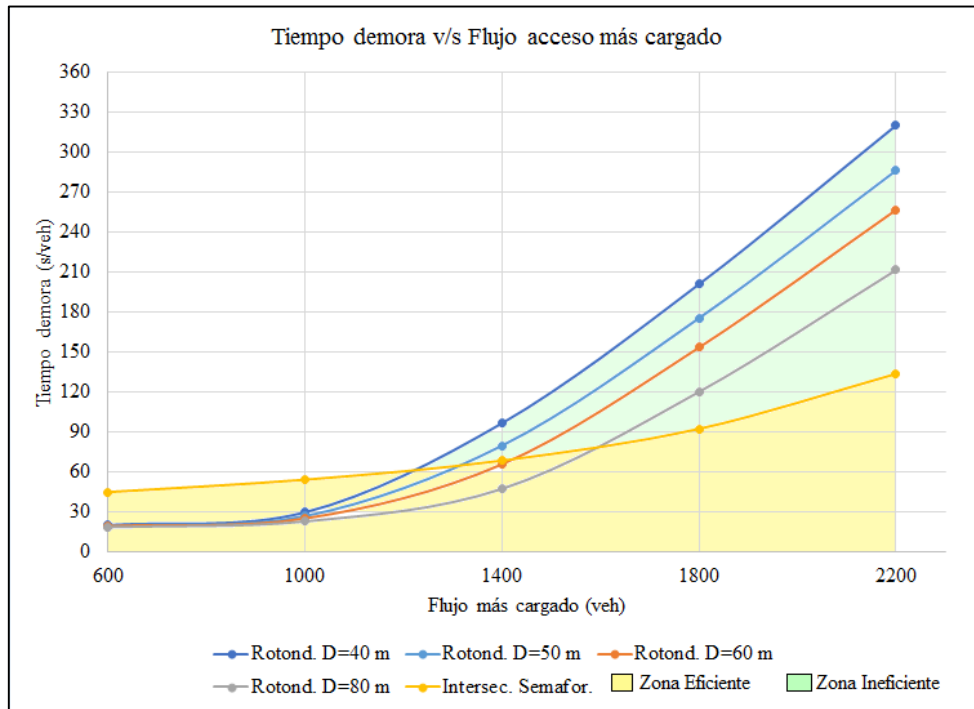


Figura 9. Giro en U rotonda v/s intersección semaforizada con 400 veh/hr, SIDRA

(Fuente: Elaboración propia)

3.10.- Simulación con AIMSUN

AIMSUN permite modelar a nivel microscópico la operación de una red de tránsito, simulando para cada vehículo las interacciones reales tales como adelantamientos, bloqueos de cruces, virajes conflictivos, formación de colas, etc, es decir, el comportamiento de cada vehículo en la red se modela continuamente a lo largo del periodo de tiempo de simulación mientras viaja a través de la red de tráfico, a partir de varios modelos de comportamiento de vehículo (seguimiento vehicular, cambio de pista, entre otros).

Debido a esto, para la simulación se utilizara adicionalmente AIMSUN, ya que permitirá, realizar una verificación de los resultados y umbrales obtenidos en SIDRA y poder analizar vehículo a vehículo, gracias a que en este, las maniobras del vehículo son modeladas en detalle utilizando los modelos de *seguimiento vehicular* y *cambio de pista*, diferente a lo empleado en SIDRA (modelo analítico).

3.7.1.- Simulación rotonda

La simulación en AIMSUN se realizara bajo las mismas variables de demanda, movimientos y geometría de diseño utilizada en SIDRA. Sin embargo los datos de entrada requeridos por AIMSUN, expresados como escenarios de simulación, están compuesto por 3 tipos de datos: la descripción de la red, los datos de demanda y el plan de control del tráfico. Estos datos descritos en el Manual del usuario de AIMSUN, se encuentran definidos y detallados en el Anexo B, sección B.3.

3.7.2.- Simulación intersección semaforizada

Para realizar la comparación de los resultados obtenidos en la rotonda, se ejecutara la simulación de la intersección semaforizada con la misma demanda y movimientos implementados en la rotonda y en SIDRA. Para ello se definieron los datos de entrada necesarios en la simulación; los parámetros globales, locales y vehiculares utilizados fueron los mismos que se implementaron en la rotonda. Los tiempos de las fases y del ciclo óptimo para los diferentes casos y que se implementaron en AIMSUN se obtuvieron a partir del software TRANSYT 14.1.2.316, el cual permite determinar el tiempo optimo y a su vez la interacción con AIMSUN.

3.11.- Resultados Simulación en AIMSUN

Los resultados obtenidos de la simulación en AIMSUN para el caso 1, 400 veh/hr, se muestran a continuación, para la rotonda y la intersección semaforizada.

3.8.1.- Simulación rotonda

La simulación se hizo bajo la misma demanda, geometría y movimientos implementados en SIDRA. Cada caso se modelo para los diámetros inscritos de 40 y 60 m. Los resultados obtenidos en AIMSUN se representan mediante la “cola virtual máxima” (veh), también utilizada como una medida de demora.

La Tabla 5 muestra la cola obtenida para el caso 1, 400 veh/hr. El resto de los resultados se encuentran en el Anexo D, sección D.1.

Tabla 5. Rotonda en AIMSUN con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda | | | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 0,00 | 0,67 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2 | 0,00 | 0,83 | 2,00 | 163,33 | 781,50 |
| 3 | 0,17 | 0,83 | 230,33 | 916,00 | 1570,67 |
| 4 | 1,00 | 327,33 | 772,17 | 1429,83 | 2051,17 |

(Fuente: Elaboración propia)

3.8.2.- Simulación intersección semaforizada

Para realizar la comparación de la cola obtenida en la rotonda con la intersección semaforizada, fue necesario la simulación de esta, tal como se describió en la metodología. La Tabla 6 muestra la cola virtual máxima (veh) en función del aumento de la demanda en el acceso más cargado.

Tabla 6. Cola Virtual Máxima Intersección Semaforizada con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Intersección semaforizada | | | | | |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 0,00 | 1,00 | 1,67 | 2,00 | 2,50 |
| 2 | 1,17 | 1,50 | 2,17 | 3,33 | 4,67 |
| 3 | 1,33 | 1,50 | 191,83 | 591,33 | 972,67 |
| 4 | 1,57 | 160,00 | 572,33 | 923,83 | 1404,00 |

(Fuente: Elaboración propia)

Los resultados para los otros casos definidos se encuentran en el Anexo D, sección D.2.

3.8.3.- *Comparación resultados rotonda v/s intersección semaforizada*

Con los resultados anteriormente descritos se realizó una comparación para cada movimiento aplicado (giro derecha, sigue directo, giro izquierda y giro en U), tal como se ve en los gráficos mostrados en las Figuras 10, 11, 12 y 13 respectivamente.

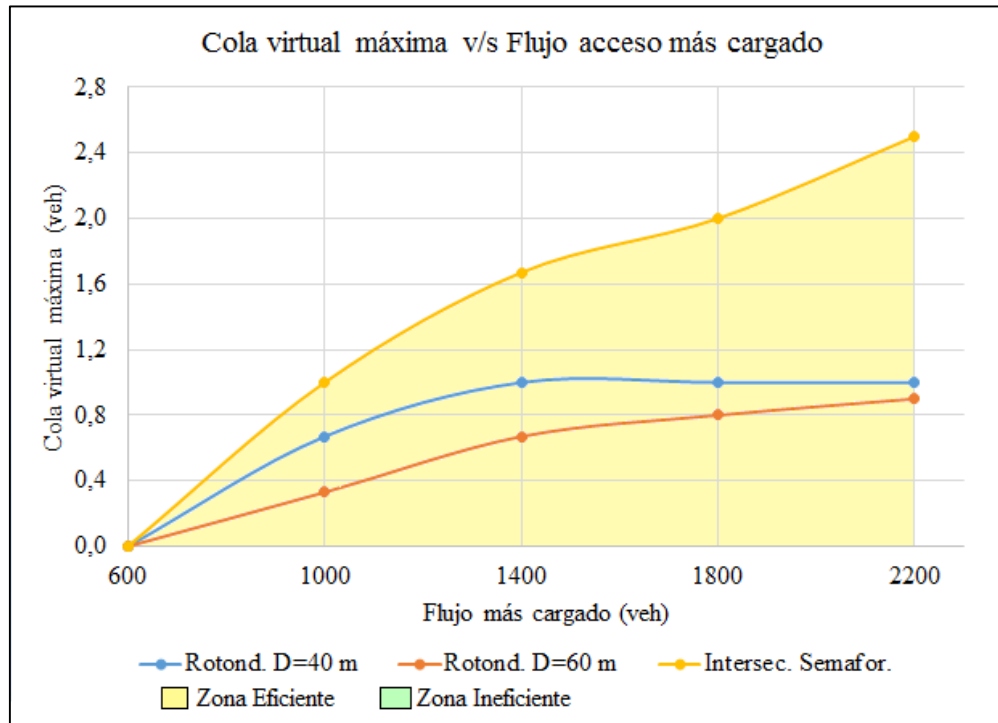


Figura 10. Giro derecha rotonda v/s intersección semaforizada con 400 veh/hr, AIMSUN

(Fuente: Elaboración propia)

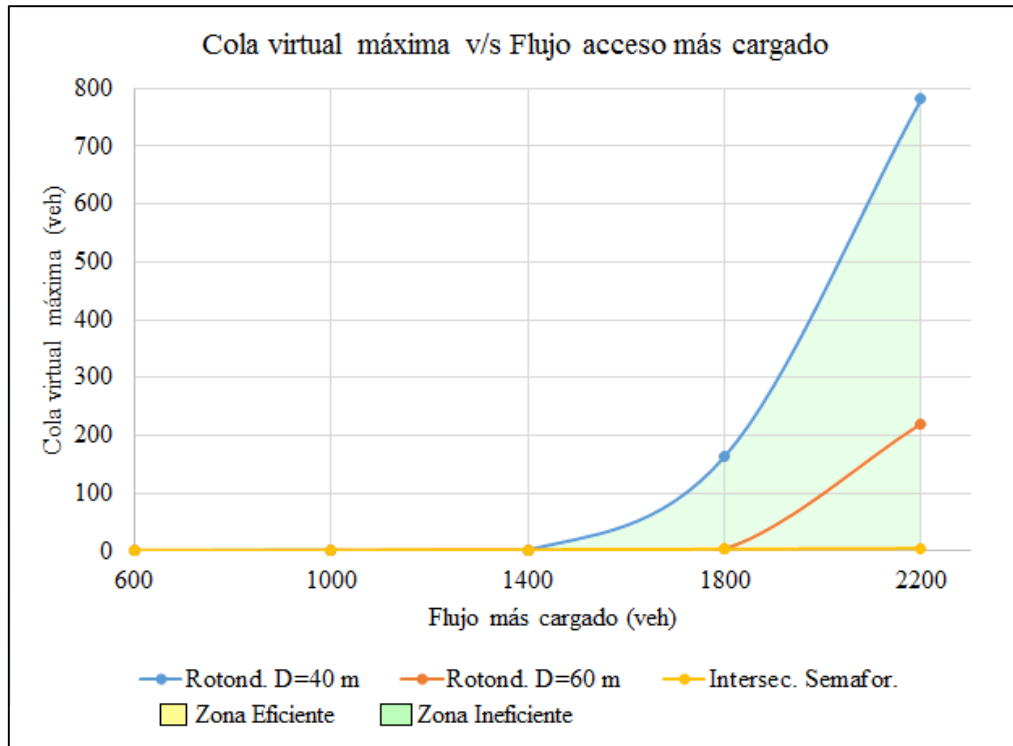


Figura 11. Sigue directo rotonda v/s intersección semaforizada con 400 veh/hr, AIMSUN
(Fuente: Elaboración propia)

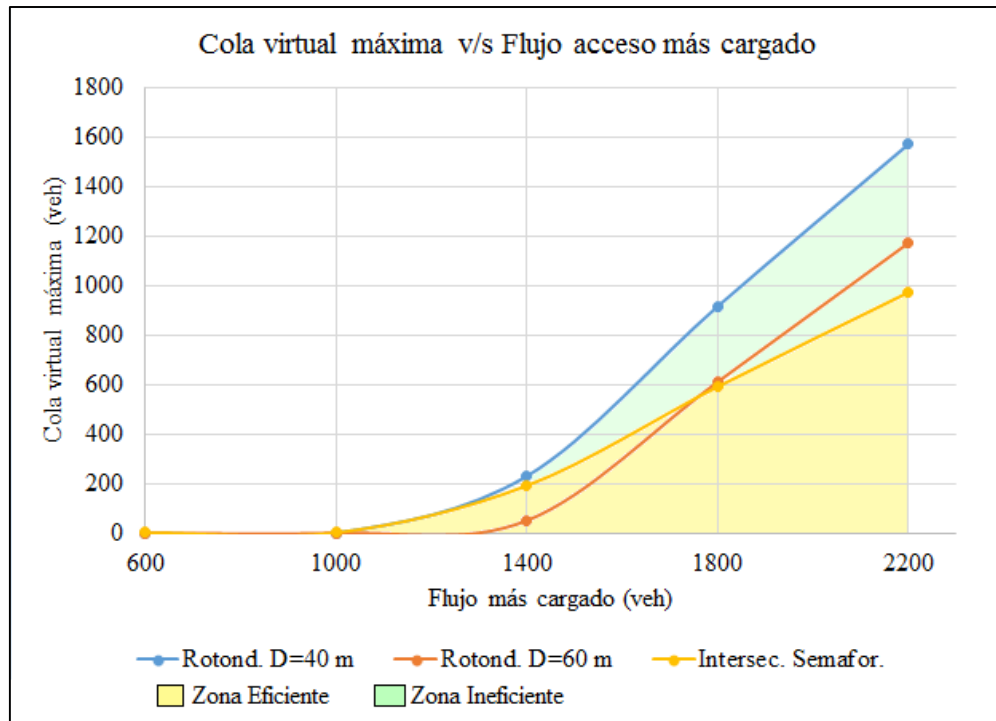


Figura 12. Giro izquierda rotonda v/s intersección semaforizada con 400 veh/hr, AIMSUN
(Fuente: Elaboración propia)

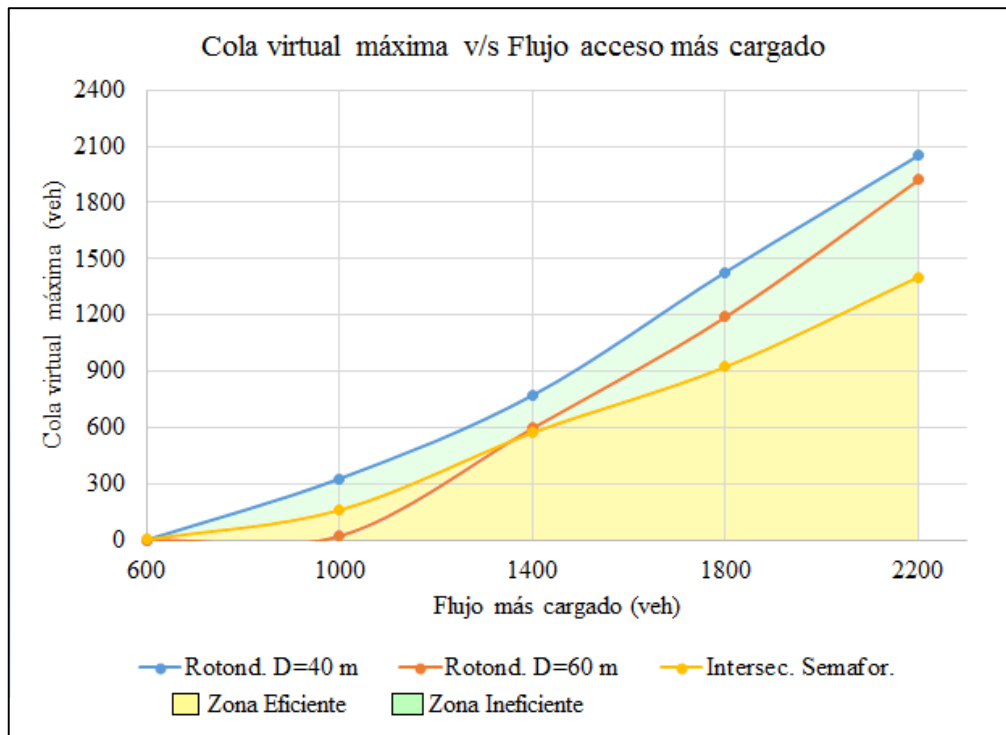


Figura 13. Giro en U rotonda v/s intersección semaforizada con 400 veh/hr, AIMSUN

(Fuente: Elaboración propia)

3.12.- Análisis rotonda semaforizada SIDRA INTERSECTION

Los sistemas de control auxiliar (señalizaciones) en la rotonda, son instalados en ciertos accesos de esta y utilizados por un tiempo parcial, ya que sólo se requieren cuando se producen condiciones de alta demanda durante las horas punta (Akçelik, 2011).

El software SIDRA INTERSECTION permite la aplicación de semaforización en las rotondas. Para ello utiliza los términos “*acceso medido*” que corresponde al acceso detenido por señales rojas y “*acceso de control*” (acceso con más demanda) que posee un detector de cola y que se beneficia por las señales de medición.

Cuando la cola en el acceso de control llega hasta el detector de cola, la señal en el semáforo del acceso medido se vuelve roja, a fin de crear una brecha en el flujo de circulación, permitiendo que el tráfico del acceso de control pueda entrar en la rotonda. Cuando el rojo en el semáforo se termina, la rotonda vuelve al funcionamiento normal. De esta forma, el acceso de control es aquel acceso saturado y que se beneficiará gracias a la señalización, mientras que el acceso medido, usualmente es el acceso aguas abajo, que afecta la brecha del acceso de control.

La Figura 14 muestra la ubicación del semáforo y el detector de cola en la rotonda de prueba.

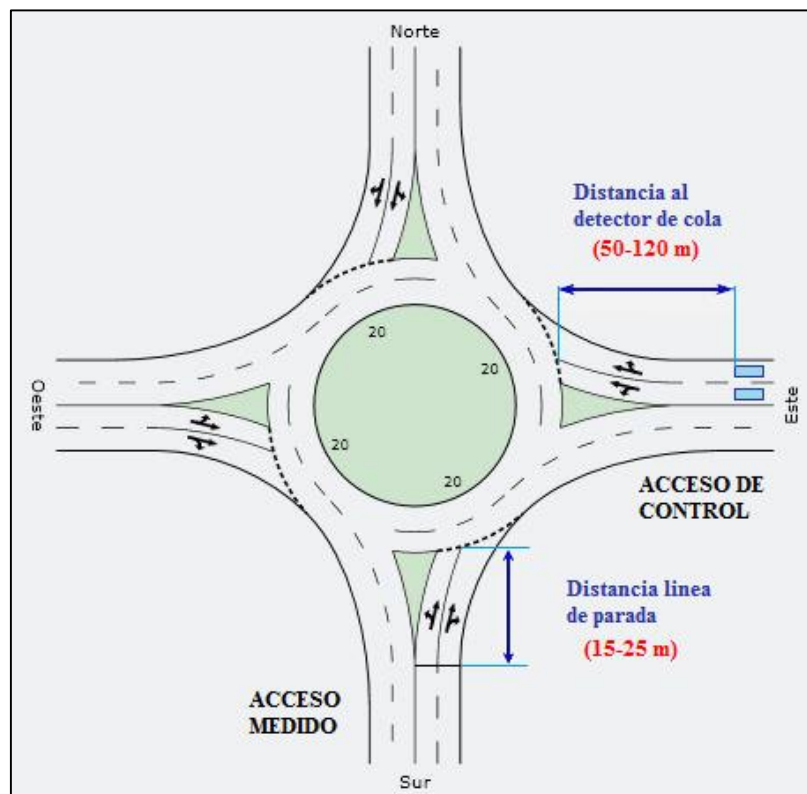


Figura 14. Rotonda Semaforizada SIDRA INTERSECTION

(Fuente: SIDRA INTERSECTION)

De esta manera para el desarrollo de la investigación, los accesos elegidos y la metodología serán:

- Acceso de control: acceso Este
- Acceso medido: acceso Sur
- Distancia detector de cola: 60 m
- Distancia línea de parada: 20 m
- Para la señalización se utilizará el tiempo de ciclo óptimo.
- La modelación se realizará para todos los movimientos y demandas que generan mayores demoras en comparación a una intersección semaforizada (valores en rojo mostrados anteriores en las tablas).

3.13.- Resultado implementación rotonda semaforizada

Aplicando la semaforización en la rotonda de prueba para aquellas condiciones (demanda y movimiento) en los cuales la rotonda funciona de forma ineficiente frente a la intersección semaforizada (valores en rojo) y a partir de los datos dados en la metodología, los resultados obtenidos para el caso 1 se muestran a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7. Rotonda con Semáforo, 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 40 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A |
| 2 | 7,5 A | 8,5 A | 11,2 B | 11,3 B | 14,5 B |
| 3 | 15,1 B | 18,1 B | 42,8 D | 121,2 F | 212,9 F |
| 4 | 20,2 C | 29,8 C | 131,5 F | 227,1 F | 331,0 F |

(Fuente: elaboración propia)

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ROTONDA GENERAL BONILLA

Las rotondas en ciertas horas del día se ven afectadas por la presencia de la demanda asimétrica lo que genera que esta funcionen de manera ineficientes, tal es el ejemplo que se genera en la Rotonda Bonilla, Concepción, condición que se produce en las horas más críticas, específicamente en la punta mañana, donde la mayor demanda se genera desde el acceso Este al Sur (Concepción) y en la punta tarde, desde los accesos Este y Sur hacia el acceso Oeste (Talcahuano). Debido a esto se analizará el efecto de la demanda producida en la punta mañana (07:00-08:00).

Los movimientos de los flujos producidos en la rotonda Bonilla son mostrados en la Figura 15 a continuación.



Figura 15. Flujos generados en Rotonda General Bonilla

(Fuente: Google Earth y elaboración propia)

La geometría de la rotonda Bonilla utilizada para la simulación posee los siguientes valores:

- Velocidad diseño de entrada deseable (km/h): 40
- Diámetro inscrito (m): 80
- Angulo de entrada (°): 30

- Radio de entrada (m): 20
- Radio de salida (m): 30
- N° pistas por acceso (entrada): 2 en los accesos más un pista que conecta al bypass
- Ancho entrada (m): 4
- N° pistas circulantes: 3
- Ancho pista circulatoria (m): 3,8

El valor de flujos antes descritos se muestra en la Tabla 8 a continuación.

Tabla 8. Flujos generados en Rotonda Bonilla

| N° Mov. | Flujo (veh/hr) |
|---------|----------------|
| 1 | 218 |
| 2 | 990 |
| 3 | 1254 |
| 4 | 588 |
| 5 | 720 |
| 6 | 228 |
| 7 | 600 |
| 8 | 920 |
| 9 | 810 |
| 10 | 584 |

(Fuente: Elaboración propia)

Como se puede apreciar, en la rotonda se realizan mayormente giros a la izquierda y con la presencia de un acceso más saturado que el resto (2200 veh/hr en acceso Este), generándose en este el movimiento más cargado (giro a la izquierda, 1200 veh/hr aproximadamente).

4.1.- Análisis rotonda General Bonilla

Para obtener la demora generada y analizar el comportamiento de la rotonda Bonilla producto de la demanda anteriormente descrita, fue necesario estudiar la rotonda mediante SIDRA y AIMSUN. Para el análisis en SIDRA, no se consideraron los movimientos a la derecha (movimientos 1, 6 y 9) producidos en los accesos, debido al diseño de esta, ya que estos se generan en un bypass que posee la rotonda, condición que no se permite diseñar en SIDRA.

Sin embargo para la simulación de la rotonda Bonilla utilizando AIMSUN, se consideraron dos casos de análisis:

- *Caso 1:* No se consideran los giros a la derecha
- *Caso 2:* Se incorporan los bypass presentes en la rotonda, diseño que se puede realizar en AIMSUN.

4.2.- Resultados análisis

Realizando la simulación de la rotonda Bonilla mediante SIDRA y AIMSUN a partir de los flujos definidos en la Tabla 8 y la geometría presentada, los resultados obtenidos son:

4.3.1.- Resultados rotonda Bonilla en SIDRA

Los resultados obtenidos mediante la implementación de la rotonda Bonilla en SIDRA, sin considerar los giros a la derecha fue de:

- *Demora:* 363,2 s/veh
- *N.S:* F

4.3.2.- Resultados rotonda Bonilla en AIMSUN

Los resultados obtenidos mediante la simulación en AIMSUN de los 2 casos antes descritos (caso 1 y 2) se presentan a continuación, donde la demora obtenida es expresada en cola virtual máxima (veh).

- *Cola virtual máxima Caso 1:* 1478,17 veh
- *Cola virtual máxima Caso 2:* 1736,17 veh

4.3.- Implementación de semaforización en rotonda Bonilla

Debido al bajo nivel de servicio y a la alta demora experimentada en la rotonda, producto de la demanda asimétrica generada en la punta mañana, se realizará la implementación de una semaforización en la rotonda como medida de solución a la problemática, tal como se ejecutó anteriormente en la rotonda de prueba y que permitió disminuir la demora producida en esta. Para ello fue necesario definir:

- Acceso de control: Acceso Este (acceso con más demanda)
- Acceso medido: Acceso Sur
- Distancia detector de cola: 100 m
- Distancia línea de parada: 15 m

4.3.1.- Resultados semaforización

A partir de la implementación de la semaforización a la rotonda Bonilla se obtuvo el siguiente resultado:

- *Demora:* 356,8 s/veh
- *N.S:* F

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos se concluye que:

El diámetro inscrito tiene gran incidencia en la demora generada en la rotonda, reduciéndose (demora) a medida que aumenta el diámetro, debido a que permite más oportunidades para que el tráfico circulante se agrupe, aumentando la probabilidad de entrar a la rotonda y por lo tanto, mejorar la capacidad de esta. Esto concuerda con las modelos de capacidad de otros países (Anexo A) e investigaciones, que consideran la geometría como un factor importante en la capacidad y N.S de rotondas.

El movimiento giro a la derecha es más eficiente en las rotondas que en una intersección semaforizada, debido a que en esta el movimiento se realiza sin la necesidad de detenerse, siendo mucho menor que la demora producida en una intersección semaforizada debido a los tiempos de fases del semáforo.

Para el resto de los movimientos se generó un umbral (números en rojo), donde la intersección semaforizada es más eficiente que la rotonda, aumentando la zona ineficiente y la demora, a medida que se aumenta la demanda en los accesos (400, 600, 800 y 1200 veh/h), siendo este último el caso más desfavorable, donde la rotonda es menos eficiente en casi todos sus movimientos.

Es por ello que, el giro a la izquierda y giro en U, son los movimientos más invasivos en la rotonda, debido a que al ejecutarlos se debe pasar frente a todos los accesos aguas abajo del acceso de salida, bloqueándolos, disminuyendo la probabilidad de entrar a esta y aumentando la demora y por consiguiente, empeorando el N.S en cada acceso.

Al realizar la implementación de un semáforo en la rotonda se observó que el movimiento sigue derecho y giro a la izquierda se ven beneficiados producto de la medida, gracias a que disminuye la demora generada y se mejora el N.S en la rotonda, independiente de la demanda (el acceso más cargado disminuye su demora considerablemente y aumenta en los otros accesos, pero aun así, mejora el N.S de la rotonda). Sin embargo para el caso de giro en U y demandas de 400 y 600 veh/hr, la implementación del semáforo no ayuda a la rotonda, ya que provoca que en el acceso donde se pone la señal (acceso medido), la demora aumente considerablemente (más del triple), condición que no tenía antes de implementar la semaforización y que afecta en gran manera a este acceso.

La demanda asimétrica producida en la punta mañana en la rotonda Bonilla, genero altas demoras en esta, lo que justifico la implementación de un sistema de control en uno de los accesos. Si bien la demora logra disminuir debido a la medida, se aconseja analizar la utilización de este control en más de un acceso para mejorar la demora.

BIBLIOGRAFIA

- *Aimsun 8.0 Microsimulator User's Manual*. TSS – Transport Simulation Systems, 2013.
- Akçelik R., Chung E., y Besley M. (1997). Analysis of roundabout performance by modelling approach flow interactions. *Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals*, Portland, USA.
- Akçelik R. (2009). Evaluating Roundabout Capacity, Level of Service and Performance, San Antonio, Texas, USA.
- Akçelik R. (2011). Roundabout metering signals: capacity, performance and timing. Paper presented at the 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Transportation Research Board, Stockholm, Suecia.
- Barry et al. (2007). Roundabouts in the United States. NCHRP Report 572. Transportation Research Board National Research Council, Washington, D.C., USA.
- Barry et al. (2010). Roundabouts in the United States. NCHRP Report 672. Transportation Research Board National Research Council, Washington, D.C., USA.
- Hernandez L. (2008). Análisis de las estrategias de aparcamiento de autobuses urbanos en una terminal; aplicación en Barcelona, España. Proyecto de Título Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.
- Ministerio de obras públicas, Dirección de Vialidad (2013). Manual de carreteras, Volumen 3, Chile.
- Ortiz L. (2006). Calibración de un Modelo de Microsimulación para Flujo Mixto Interrumpido, con Aplicación a la Ciudad de Concepción. Proyecto de Título Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

- Robinson et al. (1999). Roundabouts: An Informational Guide. Report FHWA-RD-00-067. FHWA, U.S.Department of Transportation, Portland, USA.
- *SIDRA INTERSECTION User Guide*. SIDRA SOLUTIONS, 2012.
- Sierra F. y Outes L. (2001). Seguridad y capacidad de las rotondas modernas. XIII congreso argentino de vialidad y tránsito, Buenos Aires, Argentina.
- TRB, National Research Council,Washington (2000), Highway Capacity Manual 2000, Washington, D.C., USA.
- TRB, National Research Council,Washington (2010), Highway Capacity Manual 2010, Washington, D.C., USA.
- Wang W., Yang X. (2012). Research on Capacity of Roundabouts in Beijing. 8th International Conference on Traffic and Transportation Studies, Changsha, China.

ANEXOS

ANEXO A: ESTIMACIÓN DE DISEÑO, CAPACIDAD Y DEMORA EN ROTONDAS

A.1.- Diseño rotonda

El número de carriles de entrada en los accesos de una rotonda se diseña en función de los volúmenes de tráfico que circularan por esta (volumen de entrada + volumen circulación), tal como se muestra en la Tabla A1 a continuación

Tabla A1. Número de Carriles Requeridos

| Volumen (veh/h) | N° de carriles requeridos |
|-----------------|---|
| 0-1000 | 1 carril es suficiente |
| 1000-1300 | 2 carriles de entrada pueden ser necesarios |
| 1300-1800 | 2 carriles de entrada son suficientes |
| Sobre 1800 | Más de 2 carriles |

(Fuente: NCHRP Report 672)

Nota: Volumen= volumen de entrada + volumen circulación

El NCHRP Report 672 y el M.C. V3 recomiendan algunas dimensiones óptimas de los parámetros geométricos de diseño de una rotonda. Estos valores se encuentran definidos en la Tabla A2 mostrada a continuación.

Tabla A2. Parámetros rotonda

| Parámetro | NCHP Report 672 | | M.C. V3 |
|---|-----------------|------------|-----------------------|
| | 1 carril | 2 carriles | |
| Velocidad diseño de entrada deseable (km/h) | 40 | 40-50 | 40-50 |
| Diámetro inscrito (m) | 27-55 | 46-91 | 28-36 |
| Angulo de entrada (°) | 20-40 | 20-40 | 20-60 |
| Radio de entrada (m) | 20 | >20 | >20 |
| Radio de salida (m) | 30-60 | >45 | >20-40 |
| Ancho entrada (m) | 4,2-5,5 | 7-9,1 | >2,5 |
| Ancho carril circulatorio (m) | 4,88-6,1 | 4,3-4,9 | Ancho entrada*(1-1,2) |

(Fuente: NCHRP Report 672 y M.C. V3)

A.2.- HCM 2010, Estados Unidos

La ecuación para estimar la capacidad mediante el HCM se da a partir de la Ecuación 1.

$$C_a = \frac{V_c e^{-V_c t_c / 3600}}{1 - e^{-V_c t_f / 3600}} \quad \text{Ec. (1)}$$

dónde: C_a = capacidad de enfoque o entrada (veh / h),

V_c = flujo de circulación (veh / h),

t_c = brecha crítica (s)

t_f = tiempo seguimiento (s)

La Ecuación 1 puede simplificarse, quedando:

$$C_a = \frac{3600}{t_f} \exp\left(-\frac{t_c - t_f / 2}{3600} V_c\right) \quad \text{Ec. (2)}$$

Usando la Ecuación 2 y considerando como $t_c = 5.1$ s y $t_f = 3.2$ s, redondeando, se puede estimar la capacidad a partir de la Ecuación 3. Esta ecuación es válida para rotondas de 1 o 2 carriles que se oponen a 1 carril de circulación.

$$C_a = 1130 \exp(-0.001 V_c) \quad \text{Ec. (3)}$$

Cuando se tiene una rotonda de dos carriles que se opone a 2 carriles circulantes, la capacidad del carril derecho e izquierdo se calculan a partir de las Ecuaciones 4 y 5 respectivamente. La Ecuación 6 sirve también para dar la capacidad de entrada de una rotonda de un solo carril que se opone a dos carriles en conflicto.

$$C_a = 1130 \exp(-0.0007 V_c) \quad \text{Ec. (4)}$$

$$C_a = 1130 \exp(-0.00075 V_c) \quad \text{Ec. (5)}$$

Como se ve la capacidad está directamente relacionada con el flujo circular en conflicto de esta.

A.3.- Reino Unido

El método del Reino Unido considera para determinar la capacidad parámetros geométricos, determinándose así la capacidad a partir de la Ecuación 6 mostrada a continuación.

$$C_{e,max} = k * (F - f_c * V_c) \quad \text{Ec. (6)}$$

Con

$$F = 303 x_2 \text{ (veh / h),}$$

$$f_c = 0.21 T_D (1 + 0.2 x_2)$$

$$k = 1 - 0.00347(\phi - 30) - 0.978(1/r - 0.05)$$

$$T_D = 1 + \frac{0.5}{1 + \exp\left(\frac{D-60}{10}\right)}$$

$$x_2 = v + (e - v)/(1 + 2S)$$

$$S = (e - v)/l'$$

dónde: $C_{e,max}$ = capacidad máxima de entrada (veh / h),

V_c = flujo de circulación (veh / h),

e = Ancho de entrada (m)

v = enfoque de medio ancho (m)

l' = longitud llamada efectiva (m)

r = radio de entrada (m)

ϕ = ángulo de entrada ($^\circ$)

S = medida del grado de la quema

D = diámetro del círculo interior (m)

A.4.- Alemania

El método de capacidad de Alemania se determina a partir de la Ecuación 7:

$$C_{e,max} = n_e \frac{3600}{t_f} \left(1 - \frac{\Delta \frac{V_c}{3600}}{n_c}\right)^{n_c} \exp\left[-\frac{V_c}{3600} * \left(t_c - \frac{t_f}{2} - \Delta\right)\right] \quad \text{Ec. (7)}$$

dónde: $C_{e,max}$ = capacidad máxima de entrada (veh / h),

V_c = flujo de circulación (veh / h),

n_c = número de carriles en conflicto (1 o 2 con $n_c \leq n_e$)

n_e = número de carriles en la entrada

t_c = avance crítico = 4,1 s

t_f = tiempo de seguimiento = 2,9 s

Δ = intervalo mínimo de circulación de tráfico = 2,1 s

- Ecuación para 2 carriles, mostrada en la Ecuación 8

$$C_{e,max} = \frac{n_e^{n_F/(n_F+1)}}{t_f} \left(1 - \frac{\Delta \frac{V_c}{3600}}{n_c} \right)^{n_c} \exp \left[-V_c * \left(t_c - \frac{t_f}{2} - \Delta \right) \right] \quad \text{Ec. (8)}$$

dónde: t_c = avance crítico = 3,3 s

t_f = tiempo de seguimiento = 3,1 s

Δ = intervalo mínimo de circulación de tráfico = 1,8 s

n_F = longitud de carril corto = 1.4 veh

A.5.- Retardo de control o demora:

El HCM 2010 lo determina a partir de la siguiente Ecuación 9 mostrada a continuación:

$$d = \frac{3600}{C} + 900T \left[x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C}\right)x}{450 T}} \right] + 5 * \min[x, 1] \quad \text{Ec. (9)}$$

dónde: d = retardo de control o demora del carril(s/veh),

x= relación volumen/ capacidad del carril,

C = capacidad del carril (veh/h),

T = periodo de análisis tiempo (h) (T = 0,25 para un período de 15 min).

El valor de la constante de 5 s/veh está incluido en la ecuación para dar cuenta de la desaceleración de los vehículos con velocidad de flujo libre a la velocidad de los vehículos en la cola y la aceleración de los vehículos de la línea de parada a velocidad de flujo libre y se refiere al retardo o demora geométrica.

El cálculo de la demora en una intersección se determina a partir de la Ecuación 10.

$$d_{interseccion} = \frac{\sum d_i v_i}{\sum v_i} \quad \text{Ec. (10)}$$

dónde: d_{interseccion}= demora en la intersección, (s/veh)

d_i= demora generada en el acceso i, (s/veh)

v_i= flujo del acceso i, (veh/h)

A.6.- Longitud de la cola

Es una función de la capacidad del movimiento y el volumen de tráfico durante el período de análisis. El HCM la determina a partir de la Ecuación 11 mostrada a continuación.

$$Q_{95} \approx 900T \left[x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C}\right)(x)}{150 T}} \right] \left(\frac{3600}{C}\right) \quad \text{Ec. (11)}$$

dónde: Q₉₅ = cola-percentil 95 (veh),

x= relación volumen/ capacidad del carril,

C = capacidad del carril (veh/h),

T = tiempo periodo de análisis (h) (T = 0,25 para un período de 15 min).

A.7.- Nivel de servicio

La estimación del nivel de servicio utilizado para intersecciones no semaforizadas y semaforizadas respectivamente se muestran en la Tabla A3 y A4 a continuación.

Tabla A3. Determinación del Nivel de Servicio para Intersecciones No Semaforizadas

| Nivel de servicio | Demora (s/veh) |
|-------------------|----------------|
| A | 0-10 |
| B | >10-15 |
| C | >15-25 |
| D | >25-35 |
| E | >35-50 |
| F | >50 |

(Fuente: HCM 2000)

Tabla A4. Determinación del Nivel de Servicio para Intersecciones Semaforizadas

| Nivel de servicio | Demora (s/veh) |
|-------------------|----------------|
| A | 0-10 |
| B | >10-20 |
| C | >20-35 |
| D | >35-55 |
| E | >55-80 |
| F | >80 |

(Fuente: HCM 2000)

ANEXO B: MODELOS MICROSCÓPICOS

Para poder llevar a cabo el análisis del nivel de servicio en una rotonda bajo condiciones de demanda asimétrica será necesario el estudio de esta mediante modelos microscópicos. Estos estudios permitirán aplicar a la rotonda distintos valores de demanda asimétrica, es decir, un acceso con mayor flujo que el resto y con diferentes valores de diámetro inscrito, lo que permitirá obtener el tiempo de demora en cada uno de los accesos bajo las diferentes condiciones aplicadas y así poder analizar su comportamiento frente a esta situación, sin la necesidad de su implementación en la realidad del sistema.

La definición de algunos de los parámetros utilizados se presenta a continuación.

- La **simulación** (Shannon, 1998. Citada por Ortiz, 2006), es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y experimentar con él mismo para entender el comportamiento del sistema y/o evaluar una serie de estrategias para la operación de este. Además permite identificar cuáles son las variables de mayor importancia para el estudio del comportamiento del sistema.
- **Microsimulación**: La principal característica de estos modelos es que distinguen individualmente a cada vehículo en la red simulada a cada instante o “simulation step”. Este modelo describe tanto las entidades del sistema como sus actividades en forma detallada. Las reacciones o comportamiento del conductor de cada vehículo están normadas según los modelos de seguimiento vehicular y modelos de cambio de pistas, entre otros (Briones, 2008).

Para llevar a cabo la microsimulación se utilizó el software AIMSUN NG, pues modelan las características individuales de cada vehículo o conductor y además se usó SIDRA INTERSECTION.

Cada uno puede ser clasificado de distintos modo y se diferencian por el nivel de detalle con que trabajan. Por consiguiente es necesario entender en qué consisten y en qué se diferencian. A continuación se detallan cada uno de estos modelos.

B.1.- SIDRA INTERSECTION

SIDRA INTERSECTION es un paquete de software utilizado para intersecciones señalizadas individuales (con tiempo fijo y actuado), rotondas, rotondas con señales de medición, intersecciones con ceda el paso, entre otras, y sirve para estimar la capacidad de la red, nivel de servicio y análisis del rendimiento de esta. Para esta investigación la versión utilizada fue la 5.1.

Lanzado por primera vez en 1984, ha estado en desarrollo continuo con nuevas versiones. Es el software más popular para rotondas y otras intersecciones en los EE.UU., Canadá, Australia, Europa y en otros lugares en todo el mundo. Es reconocido por el HCM, Guía TRB-FHWA para rotondas y muchas guías locales en los EE.UU.

SIDRA INTERSECTION utiliza para su desarrollo el modelo analítico, el cual se encuentra definido por el HCM como "un modelo que relaciona los componentes del sistema mediante consideraciones teóricas que son validadas y calibradas por los datos de campo." Son aquellos que utilizan cálculos matemáticos directos para determinar los estados del sistema.

Mediante SIDRA se puede estimar el rendimiento de una rotonda a partir de diferentes modelos que vienen incluidos en él, tales como, el propio modelo SIDRA Standard, HCM 2000, FHWA 2000 y modelo German.

Permite el análisis de uno o varios carriles e incluye plantillas para rotondas. También ofrece la posibilidad de ingresar las condiciones de tráfico locales, especificar los datos de entrada, incluyendo el modelo a utilizar y el "análisis de sensibilidad", que permite probar los efectos de las variaciones en los valores de los parámetros clave y diversas técnicas de calibración.

B.1.1.- Parámetros de entrada.

Es así que, los datos de entrada que se deben ingresar al programa son: geometría, definición de movimientos producidos en el sistema, demanda de tráfico, características de la flota vehicular, aceptación de brecha y tiempo de seguimiento y por último, elección del modelo a utilizar.

a) Geometría

Se pueden detallar los valores geométricos de la intersección a analizar y el diseño que tendrá esta. Para ello se deben definir los siguientes parámetros:

- Configuración de la pista:
 - Tipo de pista (Normal, continuo, carril de deslizamiento, etc)

- Pista corta (definir si es que existe la presencia o no), largo y tipos de movimientos generados en cada pista (pista exclusiva o compartida).
 - Datos del acceso: Nombre, mediana (se puede ingresar el ancho de esta en caso de existir).
 - Geometría de la rotonda: Diámetro interior, n° y ancho de carriles circulantes.
 - Calibración del modelo: La intersección o el acceso se calibran utilizando el Factor Medio Ambiente. Como valor general para las condiciones de los Estados Unidos se utiliza 1.2 y es el valor por defecto que viene en el programa. Además se puede calibrar los parámetros de aceptación de brecha y tiempo de seguimiento.
 - Datos de entrada y salida de la pista: Ancho de la pista, pendiente.
 - Datos de entrada de la pista:
 - Flujo de saturación básico: Este valor depende del tipo de área en la cual está inmersa la intersección. Siendo 1900 veh/h para el área tipo 1 (condiciones ideales, poca presencia de peatones, buena visibilidad, buena geometría, etc) y 1750 veh/h para el área tipo 2 (malas condiciones, geometría estrecha, gran presencia de peatones, poca visibilidad, buena geometría, etc)
- b) Volúmenes:
- Volúmenes por acceso: Aquí se ingresa el flujo que se encuentra presente en cada movimiento del acceso de la intersección, definido anteriormente.
 - Vehículos pesados: Se define el porcentaje de vehículos pesados presentes en cada acceso. Los efectos de los vehículos pesados en la corriente de entrada y en la corriente circulante se tienen también en consideración. Para ello, los datos de vehículos pesados se pueden especificar para cada origen/destino por separado y asimismo se pueden ingresar también datos geométricos del vehículo.
 - Factor de hora punta.
 - Ocupación por vehículo (n° de personas por auto).
- c) Datos de la ruta: Se basa en los movimientos origen/destino. Para ello se definirá:
- Velocidad de entrada y salida del cruce.
 - Distancia, velocidad y radio de negociación: En caso de no tener esos datos SIDRA utiliza modelos analíticos para la estimación de estos valores, además de la aceleración, desaceleración, distancias de giros y paso de los vehículos en las rotondas. Estas variables son importantes tanto para fines de seguridad como de

análisis de eficiencia y son necesarios para determinar los retrasos geométricos, el consumo de combustibles, emisiones de contaminantes y los valores de costo de operación para el tráfico a través de la rotonda.

- Tipo de arribo del flujo: Aquí se describe el tipo de llegada, esto es válido para intersecciones.
- d) Datos de los movimientos: Se especifica la información que concierne a cada movimiento definido, además de datos geométricos de la flota vehicular
- Nombre del movimiento, largo y distancia entre vehículos livianos y largo y distancia entre camiones.
- e) Prioridades: En este diálogo se establecen los movimientos opuestos de cada movimiento seleccionado.
- f) Parámetros de aceptación de brecha
- Los parámetros de aceptación de brecha utilizados por el software, se basan empíricamente, y permiten ver además los efectos de muchos parámetros geométricos de la rotonda (esto difiere de los modelos antiguos que utilizan como constante la brecha crítica y el tiempo de seguimiento). Para el caso de rotondas, en caso de no tener estos valores, el programa los calcula en función el diámetro inscrito, flujo circulante, entre otros factores.
- g) Peatones: Se puede indicar la presencia de peatones en cada acceso, el n° de peatones/hr, velocidad, espacio entre ellos, entre otros parámetros.
- h) Definición de fases y tiempo de ciclos
- Fases: Aquí se define la cantidad de fases y los tipos de movimiento para cada una.
 - Ciclos: El tiempo de ciclo puede ser ingresado por el usuario. El programa calcula dos tipos de tiempo, “*tiempo de ciclo práctico*” que optimiza el grado de saturación de los movimientos más críticos y el “*tiempo de ciclo óptimo*” que optimiza el parámetro de rendimiento seleccionado (demora). Para ambos tiempos se puede definir el ciclo óptimo y mínimo, además de los tiempos de amarillo y todo rojo. El tiempo de ciclo mínimo (40 s) y máximo (120 s) aplicado en la intersección semaforizada se basó en la recomendación del Manual de Señalización, capítulo 4 (Semáforos).
- i) Configuración del modelo: Se deben definir los parámetros que utilizara el modelo para realizar la modelación. Estos parámetros son:

- Nivel de servicio: SIDRA permite la posibilidad de elegir el método de estimación del N.S, recomendándose para las rotondas la utilización de los criterios del HCM para intersecciones no semaforizadas, definidos anteriormente. Además de existir los umbrales definidos en función de la demora, están los definidos en función del grado de saturación (volumen/capacidad) y los que utilizan ambos criterios.
- Parámetro de rendimiento: Se define la medida de rendimiento para optimizar el desempeño de la intersección. Esta se utiliza para determinar el ciclo óptimo.
- Percentil de cola: Permite definir el percentil de la cola que se determinara para los informes de salida.
- Capacidad mediante aceptación de brecha: Aquí se selecciona el método que permitirá calcular la capacidad en función de la aceptación de brecha. Los modelos disponibles son: SIDRA Standard (Akçelik M3D), Akçelik M1, Sieglloch M1 y Traditional M1.
- Modelo rotonda: En el caso de rotonda se puede elegir entre el método SIDRA Standard y HCM 2010. Para cada uno de estos métodos se recomienda los parámetros mostrado en la Tabla B1.

Tabla B1. Parámetros para modelos de rotondas

| Parámetro | SIDRA Standard | US HCM 2010 |
|---|--------------------------------------|---|
| Nivel de servicio | Demora(HCM 2000) | Demora y grado de saturación |
| Método N.S. Rotondas | Igual a intersecciones semaforizadas | Igual a intersecciones con señales de control |
| Capacidad mediante aceptación de brecha | SIDRA Standard (Akçelik M3D) | Traditional M1 |

(Fuente: SIDRA INTERSECTION User Guide, 2012)

B.1.2.- Modelo de análisis de SIDRA

a) Análisis pista por pista

SIDRA es una herramienta de evaluación de tráfico micro-analítico que emplea el análisis pista por pista, es decir, utiliza las ecuaciones para predecir la capacidad y el rendimiento (retraso, longitud de la cola, N.S, etc) para cada carril de forma individual en vez de todos los carriles de la aproximación (por ejemplo, método utilizado por ARCADY) o el grupo de pistas (utilizado por el HCM). Esto tiene importantes implicaciones en términos de los resultados obtenidos. Se combina además con un modelo de aceptación de brecha y tiempo de seguimiento, de manera que se

considera el comportamiento ("rendimiento") de los conductores en las rotondas modernas. Asimismo, los factores de geometría de la rotonda son parámetros relevantes que deben ser definidos, tales como, ancho de entrada de la pista, diámetro inscrito, número de pistas en cada acceso y número de pistas circulantes, ángulo de entrada, entre otros, cuyos valores son relevantes para estimar la capacidad y nivel de servicio de esta (Akçelik et al., 1997).

b) Modelos de capacidad y rendimiento

SIDRA utiliza una señal de la analogía y desbordamiento de cola para estimación de la capacidad y del rendimiento. Este método es consistente con los modelos tradicionales de aceptación de brechas y la teoría de colas. Las estimaciones de la SIDRA fórmula de capacidad son muy similares a las dadas por fórmulas brecha de aceptación alternativos dado los mismos valores de los parámetros que describen la entrada y circulación características de la corriente.

c) Retrasos geométricos

SIDRA INTERSECCIÓN determina retrasos geométricas como una función de las velocidades de aproximación y salida del sistema, así como las velocidades de negociación de la rotonda, que dependen de las características geométricas de esta, así como también las características de aceleración y desaceleración de los vehículos .

Retrasos geométricos se añaden a los retrasos de cola, y se consideran parte de la demora control.

d) Pista dominante

Un aspecto importante del método SIDRA es la designación de pistas de entrada "dominantes" y pistas "subdominantes". La pista dominante es la pista con el más alto flujo del acceso, excepto cualquier pista de deslizamiento o pista exclusivas. Todas las otras pistas son pistas subdominante. Es importante destacar que la capacidad de un carril subdominante es menor que la capacidad de una pista dominante. Además, debido a que las capacidades y los flujos de las pistas son interdependientes, se utiliza un método iterativo para elegir el carril dominante. Para ello, todos los grupos de carriles se consideran en conjunto. Si todos ellos tienen flujos iguales, la pista con el mayor giro a la izquierda o giro a la derecha se considera como pista dominante. A su vez, si el giro a la izquierda y a la derecha también son iguales, la pista más a la derecha es nominada como dominante.

La modelación para la pista corta se basa en relaciones matemáticas entre la parte posterior de la cola y el espacio disponible en el almacenamiento de colas.

Adicionalmente se pueden implementar señales de medición a las rotondas.

En la Figura B1 se encuentra una visualización del ambiente de SIDRA.

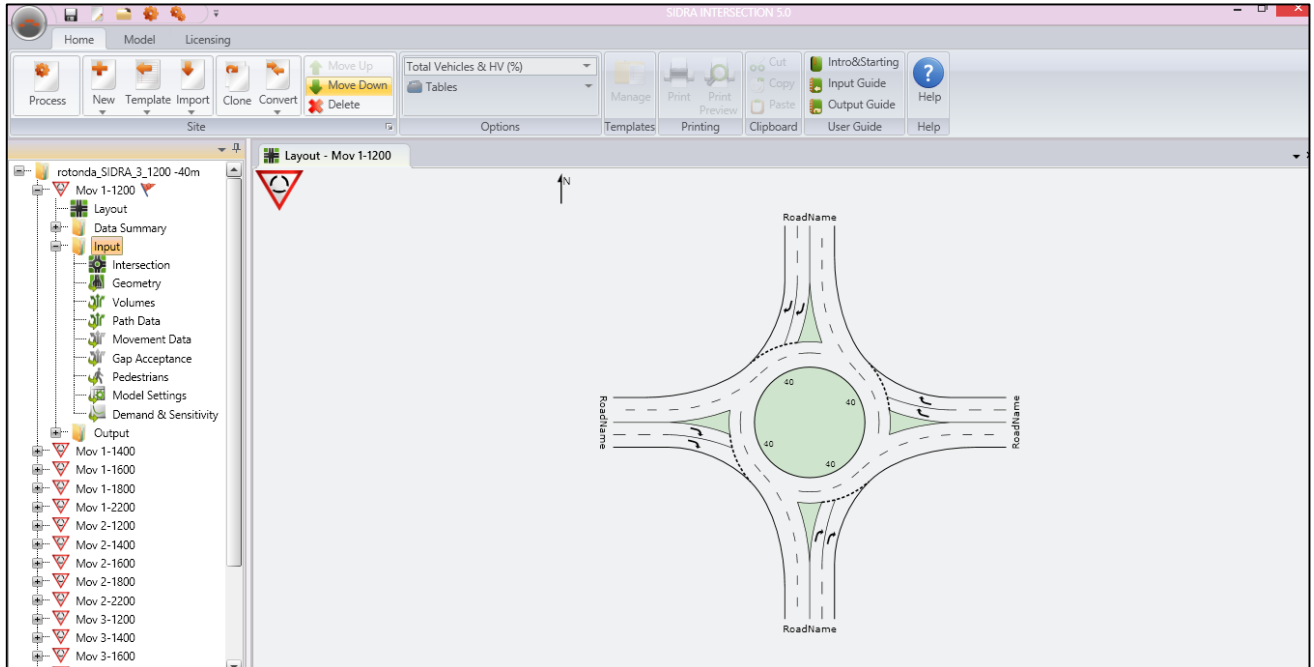


Figura B1. Visualización del ambiente de SIDRA

(Fuente: SIDRA INTERSECTION 5.1)

B.2.- Parámetros ocupados en SIDRA INTERSECTION

B.2.1.- Análisis rotonda

Los parámetros utilizados en la rotonda se encuentran definidos en la Tabla B2 a continuación.

Tabla B2. Parámetros utilizados para Rotonda en SIDRA

| Parámetros | |
|--|--|
| Geometría | |
| <i>Tipos de pista</i> | Normal |
| <i>Calibración modelo (Factor medioamb.)</i> | 1,2 |
| <i>Flujo de saturación básico</i> | 1900 veh/hr |
| El resto de los datos geométricos se definieron anteriormente. | |
| Volúmenes | |
| <i>Volúmenes por acceso</i> | Se utilizaron los volúmenes descritos en la ¡Error! o se encuentra el origen de la referencia.. |
| <i>% vehículos pesados</i> | 0% (Solo se consideraron vehículos livianos) |
| <i>Factor de hora punta</i> | 95% |
| <i>Ocupación por vehículo</i> | 1,2 pers/veh |
| Datos de la ruta | |
| <i>Velocidad de entrada al cruce</i> | 40 km/hr |
| <i>Velocidad de salida del cruce</i> | 40 km/hr |
| <i>Distancia, velocidad y radio de negociación</i> | No se posee información, por lo tanto el programa lo calculara |
| Datos de los movimientos | |
| <i>Largo vehículo liviano</i> | 4,65 m |
| <i>Espacio entre vehículos livianos</i> | 6,81 m |
| Aceptación de brecha | |
| <i>Brecha y tiempo de seguimiento</i> | Estos parámetros son determinados por el programa |
| Peatones | |
| Para este caso no se considerara la presencia de peatones, ya que solo se analizara el efecto de la demanda asimétrica | |
| Configuración del modelo | |
| <i>Modelo utilizado</i> | SIDRA Standard |
| <i>Nivel de servicio</i> | Demora (HCM 2000) |
| <i>Parámetro de rendimiento</i> | Demora |
| <i>Capacidad mediante aceptación de brecha</i> | SIDRA Standard (Akçelik M3D) |
| <i>Método N.S</i> | Igual a intersecciones semaforizadas |

(Fuente: Elaboración propia)

B.2.2.- Análisis intersección semaforizada

Los parámetros que se introdujeron en SIDRA para realizar el estudio de la intersección son mostrados en la Tabla B3 a continuación. Los datos peatonales, de movimiento y volumen fueron los mismos descritos en la Tabla B2 para rotondas.

Tabla B3. Parámetros utilizados para Intersección Semaforizada en SIDRA

| Parámetros | |
|---|--|
| Geometría | |
| <i>Tipos de pista</i> | Normal |
| <i>Largo de las pistas</i> | 500 m |
| <i>Ancho pista</i> | 3,5 m |
| <i>Nº pistas por acceso (entrada)</i> | 2 |
| <i>Mediana</i> | No |
| <i>Calibración modelo (Factor medioamb)</i> | 1,2 |
| <i>Flujo de saturación básico</i> | 1900 veh/hr |
| El resto de los datos geométricos se definieron anteriormente. | |
| Datos de la ruta | |
| <i>Velocidad de entrada al cruce</i> | 50 km/hr |
| <i>Velocidad de salida del cruce</i> | 50 km/hr |
| <i>Distancia, velocidad y radio de negociación</i> | No se posee información, por lo tanto el programa lo calculara |
| <i>Tipo de arribo del flujo</i> | Llegadas al azar |
| Aceptación de brecha | |
| <i>Brecha</i> | 4,5 s |
| <i>Tiempo de seguimiento</i> | 2,5 s |
| Fases y tiempo de ciclo | |
| <i>Nº de fases</i> | Depende del tipo de movimiento que se esté analizando. |
| <i>Tipo de ciclo</i> | Ciclo optimo |
| <i>Ciclo mínimo</i> | 40 s |
| <i>Ciclo máximo</i> | 120 s |
| Obs.: | |
| <ul style="list-style-type: none"> Para el caso de giro a la izquierda y giro en U, en el diagrama de fases estos movimientos se consideraron como movimientos protegidos. | |
| Configuración del modelo | |
| <i>Modelo utilizado</i> | SIDRA Standard |
| <i>Nivel de servicio</i> | Demora (HCM 2000) |
| <i>Parámetro de rendimiento</i> | Demora |
| <i>Capacidad mediante aceptación de brecha</i> | Traditional M1 |

(Fuente: Elaboración propia)

Para el flujo de saturación básico (rotonda e intersección semaforizada) se consideró área tipo 1 (condiciones ideales, poca presencia de peatones, buena visibilidad, etc.) con 1900 veh/hr. La brecha y el tiempo de seguimiento para la intersección semaforizada se basó en la recomendación del Manual del usuario de SIDRA. El tiempo de ciclo mínimo (40 s) y máximo (120 s) utilizado para la intersección semaforizada se fundamentó en el Manual de Señalización, capítulo 4 (Semáforos).

B.3.- AIMSUN NG

AIMSUN NG (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), es una herramienta de simulación de tráfico desarrollada por TSS, Transport Simulation Systems. AIMSUN el simulador microscópico interactivo avanzado para redes urbanas e interurbanas, es un simulador de tráfico microscópico que puede tratar diferentes redes: urbanas, autopistas, carreteras, rotondas, arterias y cualquier combinación entre ellas.

AIMSUN permite modelar a nivel microscópico la operación de una red de tránsito, simulando para cada vehículo las interacciones reales tales como adelantamientos, bloqueos de cruces, virajes conflictivos, formación de colas, etc, es decir, el comportamiento de cada vehículo en la red se modela continuamente a lo largo del periodo de tiempo de simulación mientras viaja a través de la red de tráfico, a partir de varios modelos de comportamiento de vehículo (seguimiento vehicular, cambio de pista, entre otros).

Algunas aplicaciones de este micros simulador son el análisis y evaluación de rediseños viales (ampliación de calles, cambio de geometrías, cruces a desnivel, pistas de viraje, etc.), análisis del impacto de cambios operacionales (cambio en el sentido de calles, desvíos de tránsito, etc), análisis de políticas de control de tránsito (programación de semáforos fija o dinámica, diseño de fases, desfases entre semáforos, etc.), modelación de Transporte Público (corredores exclusivos de buses, ubicación de paraderos, etc.), modelación de incidentes viales entre otros casos (Hernández, 2008)

Los datos de entrada requeridos por AIMSUN forman lo que se llama escenario de simulación, en donde un set de parámetros de ésta define el experimento. El escenario está compuesto por cuatro tipos de datos: la descripción de la red, el plan de control de tráfico, datos de demanda de tráfico y planes de transporte público. Para realizar la simulación se definen valores fijos tales como, tiempo de simulación, período, entre otros, y definir parámetros que calibran a los modelos (tiempos de reacción, tiempos de reacción en reposo, etc. Estos valores de calibración se definirán más adelante

B.3.1.- Parámetros del Modelo

En una simulación del tipo microscópica, las maniobras del vehículo son modeladas en detalle utilizando los modelos de *seguimiento vehicular* y *cambio de pista*. Estos modelos de comportamiento son función de varios parámetros que permiten modelar diferentes tipos de vehículos.

Estos parámetros son en función de las características del tráfico que desea reproducir y del comportamiento de los conductores, de manera que es el usuario quien ingresa estos valores.

Es así que estos parámetros se pueden definir en 3 grandes grupos.

- Parámetros Globales de Red.
- Parámetros Locales de sección.
- Atributos vehiculares.

a) Parámetros Globales

Dentro de este grupo de parámetros se encuentra una sub-clasificación, la cual está compuesta por:

a.1) Parámetros Globales Generales

Estos parámetros gobiernan los tres modelos básicos de comportamiento del vehículo (siguiente vehículo, cambio de carril y modelo de aceptación de brecha) y afectan el rendimiento de toda la red.

- Paso de simulación: Es el sistema que actualiza el intervalo o ciclo de tiempo a cada paso de la simulación, en donde el estado de todos los elementos del sistema se ponen al día. Está en el rango de 0,1 a 1,0.
- Tiempo de reacción del conductor: Es el tiempo que le toma al conductor reaccionar frente a cambios en la velocidad del vehículo que lo precede.
- Tiempo de reacción en reposo: Es el tiempo que le toma a un vehículo detenido reaccionar a la aceleración de un vehículo que va adelante, o a un semáforo que cambia a luz verde.
- Velocidad entrando a la cola.
- Velocidad dejando la cola.

Los dos últimos parámetros afectan la recolección de datos estadísticos para detenciones y tiempos de cola.

a.2) Parámetros Globales de seguimiento vehicular

Es el set de parámetros globales utilizados en el modelo de seguimiento vehicular para dos pistas.

- Número de vehículos.
- Máxima distancia entre vehículos.
- Máxima diferencia de velocidad (entre una pista y la pista adyacente).
- Máxima diferencia de velocidad en rampas de acceso (entre la pista principal y la pista de la rampa de acceso).

a.3) Parámetros Globales de Cambio De Pista

Es el set de parámetros globales utilizados en el modelo de cambio de pista.

- Porcentaje de adelantamiento (el valor debe encontrarse entre cero y uno y su valor por defecto es 0,9): Sirve para modelar la decisión de adelantar.
- Porcentaje de recuperación (el valor debe encontrarse entre cero y uno y su valor por defecto es 0,95): Es el porcentaje de la velocidad desde el cual un vehículo decide volver a la pista lenta después de realizar un adelantamiento.
- Modelo de rampa de acceso

b) Parámetros Locales

Estos parámetros son aplicados a los vehículos mientras ellos circulen a lo largo de una sección, pero cambian cuando el vehículo entra en una nueva sección.

- Velocidades: Velocidad límite por pista, límite de velocidad de la sección (Máxima velocidad permitida a través de la sección), velocidad de viraje y velocidad de intersección.
- Distancia de visibilidad en intersecciones.
- Zonas de cambio de pista:
 - Distancia zona 1.
 - Distancia zona 2.

Ambos parámetros son distancias desde su zona hasta donde finaliza la siguiente sección y se definen a partir del tiempo (segundos), son utilizados en el modelo de cambio de pista e influyen principalmente en la distancia en que un vehículo quiere cambiar de pista para realizar un giro en la próxima intersección.

- Pendiente de la sección.
- Máximo tiempo de cesión de paso variable.

c) Atributos Vehiculares

Estos parámetros están definidos a nivel del tipo de vehículos, en donde es posible definir el valor medio de los atributos. Los parámetros que caracterizan a cada vehículo son los siguientes:

- Características distintivas: Nombre, largo, ancho y mínima distancia entre vehículos.
- Características de funcionalidad: Máxima Velocidad deseada, máxima aceleración y desaceleración normal.

- Aceptación de guiado (probabilidad que un vehículo siga una recomendación, desde $0 < \lambda < 1$).
- Máximo tiempo de ceda el paso (periodo en que un vehículo está esperando cruzar o incorporarse a una intersección prioritaria).
- Vehículos guiados (Es el porcentaje de vehículos que son guiados a través de la red) y vehículos Equipados.

B.3.2.- Modelos utilizados en AIMSUN

Durante la simulación del transporte privado a lo largo de la red, la información de los vehículos se actualiza de acuerdo a ciertos modelos de comportamiento que rigen su movimiento, estos modelos son:

a) Modelo de Seguimiento Vehicular

El modelo de seguimiento vehicular implementado en AIMSUN, está basado en el modelo de Gipps de 1986 (Aimsun 8.0 Microsimulator User's Manual, 2013). En este modelo los parámetros son determinados por la influencia de las condiciones locales, es decir, del “tipo de conductor”, la geometría de la sección, la influencia de otros vehículos, etc.

Este modelo está compuesto por dos componentes:

- Aceleración
- Desaceleración

b) Modelo de Cambio de Pista

Este modelo puede ser considerado como un desarrollo del modelo de Gipps de 1986 (citada por Ortiz, 2006) en donde el cambio de pista es modelado como un proceso de decisión. Se analiza la necesidad, el deseo y la factibilidad de realizar una maniobra de cambio de pista en la ruta. Esta necesidad depende de una serie de factores como la distancia al siguiente viraje y las condiciones de tráfico existentes, las cuales son medidas como la velocidad y los largos de cola. Para su implementación este modelo utiliza los parámetros que están relacionados con la probabilidad de que un vehículo cambie de pista (parámetros globales de cambio de pista, porcentaje de adelantamiento y porcentaje de recuperación) y los parámetros que influyen en el viraje de los vehículos cuando llegan a una intersección (distancia Zona 1 y Zona 2).

En la Figura B2 se encuentra una visualización del ambiente del microsimulador.

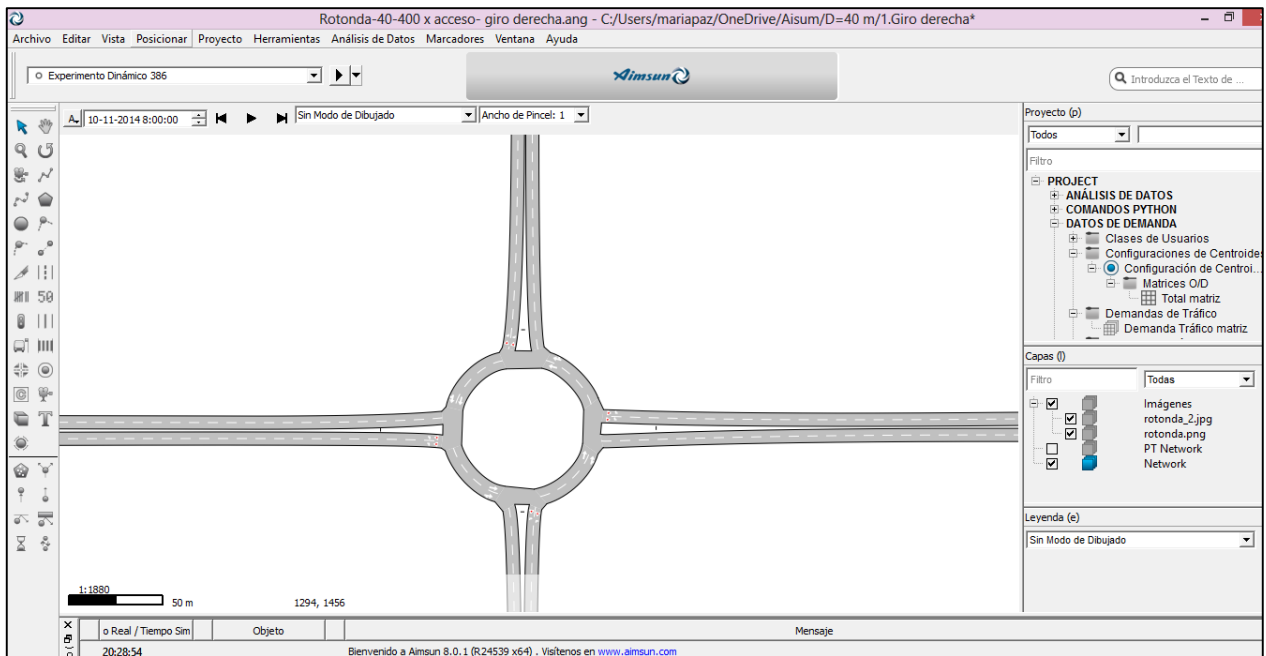


Figura B2. Visualización del ambiente de AIMSUN

(Fuente: AIMSUN 8.0)

B.4.- Parámetros de simulación en AIMSUN

B.4.1.- Simulación rotonda

Los parámetros de entrada utilizados en AIMSUN para realizar la simulación de la rotonda se encuentran definidos en la Tabla B4 a continuación.

Tabla B4. Parámetros utilizados para rotonda en AIMSUN

| Parámetros | | | | | |
|--|---|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Geometría rotonda | | | | | |
| Diseño rotonda | <i>Diámetro inscrito (m)</i> | 40 y 60 | | | |
| | <i>Radio de entrada (m)</i> | 20 | | | |
| | <i>Radio de salida (m)</i> | 30 | | | |
| | <i>N° carriles por acceso (entrada)</i> | 2 | | | |
| | <i>Ancho entrada (m)</i> | 4 | | | |
| | <i>N° carriles circulantes</i> | 2 | | | |
| | <i>Ancho carril circulatorio (m)</i> | 4,6 | | | |
| | <i>Mediana</i> | No | | | |
| Parámetros globales | | | | | |
| Parámetros globales generales | <i>Paso de simulación (s)</i> | 0,9 | | | |
| | <i>Tiempo de reacción del conductor(s)</i> | 0,9 | | | |
| | <i>Tiempo de reacción en reposo(s)</i> | 1,21 | | | |
| Parámetros globales de cambio de pista | <i>Porcentaje de adelantamiento (%)</i> | 90 | | | |
| | <i>Porcentaje de recuperación (%)</i> | 95 | | | |
| Parámetros locales | | | | | |
| Parámetros locales | <i>Velocidad limite por pista (km/hr)</i> | 50 | | | |
| | <i>Límite de velocidad de la sección (km/hr)</i> | 40 | | | |
| | <i>Velocidad de intersección (km/hr)</i> | 40 | | | |
| | <i>Pendiente de la sección (%)</i> | 0 | | | |
| Atributos vehiculares | | | | | |
| Atributos vehiculares | Parámetro | Media | D. E. | Mínimo | Máximo |
| | <i>Largo vehículo liviano (m)</i> | 4,65 | 0,51 | 3,68 | 5,81 |
| | <i>Ancho vehículo liviano (m)</i> | 1,68 | 0,08 | 1,48 | 1,86 |
| | <i>Mínima distancia entre vehículos (m)</i> | 2,16 | 0,82 | 0,66 | 4,47 |
| | <i>Máxima velocidad deseada (km/hr)</i> | 43,8 | 5,5 | 35,8 | 55,9 |
| | <i>Máx. aceleración deseada vehículos (m/s²)</i> | 2 | 0,3 | 1,6 | 2,6 |
| | <i>Desaceleración normal vehículos (m/s²)</i> | 2,3 | 0,7 | 1,5 | 4,9 |
| | <i>Aceptación de guiado (%)</i> | 75 | 10 | 65 | 90 |
| <i>Máximo tiempo de ceda el paso (s)</i> | 2 | 1 | 1 | 4 | |

(Fuente: Elaboración propia)

Los parámetros globales, locales y vehiculares definidos en la Tabla B4 y que se usaron en la modelación son los calibrados por Ortiz en 2006 para la ciudad de Concepción.

ANEXO C: RESULTADOS OBTENIDOS EN SIDRA INTERSECTION

C.1.- Análisis rotonda

La demora generada para cada uno de los casos analizados (1, 2, 3 y 4) en función de los diferentes diámetros inscritos (40, 50, 60 y 80m) se muestran a continuación.

a) Caso 1: 400 veh/hr en los accesos simétricos

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla C1 hasta la Tabla C4.

Tabla C1. Demora Rotonda D=40 m con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 40 m | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A |
| 2 | 7,5 A | 8,5 A | 11,2 B | 30,9 C | 88,7 F |
| 3 | 15,1 B | 18,1 B | 42,8 D | 122,1 F | 214,0 F |
| 4 | 20,2 C | 29,8 C | 96,6 E | 200,8 F | 319,8 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C2. Demora Rotonda D=50 m con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 50 m | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A |
| 2 | 6,2 A | 7,0 A | 8,8 A | 19,0 B | 68,2 E |
| 3 | 14,8 B | 17,2 B | 31,4 C | 98,8 F | 185,0 F |
| 4 | 19,9 B | 27,0 C | 79,8 E | 175,4 F | 286,0 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C3. Demora Rotonda D=60 m con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 60 m | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A |
| 2 | 5,1 A | 5,7 A | 7,2 A | 13,7 B | 53,9 D |
| 3 | 14,5 B | 16,5 B | 25,3 C | 82,1 F | 163,1 F |
| 4 | 19,5 B | 25,2 C | 65,8 E | 153,4 F | 256,5 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C4. Demora Rotonda D=80 m con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 80 m | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A |
| 2 | 4,1 A | 4,6 A | 5,7 A | 9,2 A | 33,7 C |
| 3 | 13,9 B | 15,4 B | 20,1 C | 57,0 E | 129,0 F |
| 4 | 18,7 B | 23,0 C | 47,4 D | 120,1 F | 211,4 F |

(Fuente: Elaboración propia)

b) Caso 2: 600 veh/hr en los accesos simétricos

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla C5 hasta la Tabla C8.

Tabla C5. Demora Rotonda D=40 m con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 40 m | | | | | |
|-----------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A |
| 2 | 8,6 A | 10,3 B | 21,8 C | 72,9 E | 140,7 F |
| 3 | 18,5 B | 30,7 C | 96,8 F | 192,9 F | 305,0 F |
| 4 | 34,5 C | 100,4 F | 213,1 F | 354,8 F | 516,1 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C6. Demora Rotonda D=50 m con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 50 m | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A |
| 2 | 7,0 A | 8,4 A | 14,1 B | 53,3 D | 116,3 F |
| 3 | 17,8 B | 25,7 C | 80,9 F | 169,1 F | 273,0 F |
| 4 | 31,6 B | 88,2 F | 190,3 F | 321,1 F | 470,7 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C7. Demora Rotonda D=60 m con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 60 m | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A |
| 2 | 5,8 A | 7,0 A | 10,8 B | 40,7 D | 99,2 F |
| 3 | 17,1 B | 22,9 C | 67,3 E | 148,3 F | 245,0 F |
| 4 | 29,5 C | 78,2 E | 170,7 F | 295,8 F | 432,7 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C8. Demora Rotonda D=80 m con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 80 m | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A |
| 2 | 4,7 A | 5,6 A | 7,9 A | 24,2 C | 73,5 E |
| 3 | 16,0 B | 19,9 B | 48,0 D | 117,1 F | 202,7 F |
| 4 | 26,8 C | 66,8 E | 149,5 F | 257,8 F | 411,6 F |

(Fuente: Elaboración propia)

c) Caso 3: 800 veh/hr en los accesos simétricos

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla C9 hasta la Tabla C12.

Tabla C9. Demora Rotonda D=40 m con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 40 m | | | | | |
|-----------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A |
| 2 | 11,9 B | 14,3 B | 48,6 D | 115,8 F | 195,5 F |
| 3 | 57,3 E | 82,8 F | 170,3 F | 288,2 F | 423,2 F |
| 4 | 34,9 F | 581,0 F | 852,5 F | 993,1 F | 1170,6 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C10. Demora Rotonda D=50 m con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 50 m | | | | | |
|-----------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A |
| 2 | 9,8 A | 11,4 B | 35,6 D | 94,8 F | 168,4 F |
| 3 | 43,2 D | 69,9 E | 150,6 F | 258,0 F | 384,0 F |
| 4 | 34,3 C | 549,5 F | 813,7 F | 941,6 F | 1102,9 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C11. Demora Rotonda D=60 m con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 60 m | | | | | |
|-----------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A |
| 2 | 8,2 A | 9,4 A | 27,0 C | 79,2 E | 147,8 F |
| 3 | 34,1 C | 58,2 E | 130,7 F | 229,6 F | 346,4 F |
| 4 | 33,3 C | 520,9 F | 786,4 F | 901,3 F | 1050,3 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C12. Demora Rotonda D=80 m con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 80 m | | | | | |
|-----------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A |
| 2 | 6,6 A | 7,4 A | 15,6 B | 56,4 E | 116,7 F |
| 3 | 26,5 C | 44,8 D | 102,7 F | 188,8 F | 291,6 F |
| 4 | 32,0 C | 502,3 C | 751,3 F | 845,7 F | 977,6 F |

(Fuente: Elaboración propia)

d) Caso 4: 1200 veh/hr en los accesos simétricos

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla C13 hasta la Tabla C16.

Tabla C13. Demora Rotonda D=40 m con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 40 m | | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A |
| 2 | 98,6 F | 121,6 F | 152,8 F | 193,1 F | 270,0 F |
| 3 | 341,2 F | 432,0 F | 546,6 F | 648,2 F | 789,5 F |
| 4 | 1475,3 F | 1563,8 F | 1669,6 F | 1791,0 F | 2074,0 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C14. Demora Rotonda D=50 m con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 50 m | | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A |
| 2 | 86,0 F | 105,3 F | 134,5 F | 175,0 F | 250,6 F |
| 3 | 317,4 F | 432,0 F | 598,3 F | 796,1 F | 954,7 F |
| 4 | 1476,1 F | 1564,5 F | 1670,3 F | 1791,7 F | 2074,7 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C15. Demora Rotonda D=60 m con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 60 m | | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A |
| 2 | 76,3 E | 94,2 F | 121,2 F | 161,1 F | 235,5 F |
| 3 | 279,6 F | 425,7 F | 691,9 F | 887,1 F | 1022,5 F |
| 4 | 1476,9 F | 1565,2 F | 1671,0 F | 1792,4 F | 2075,4 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C16. Demora Rotonda D=80 m con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda D= 80 m | | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A |
| 2 | 66,3 E | 81,7 F | 109,1 F | 144,1 F | 217,2 F |
| 3 | 115,6 F | 313,7 F | 732,1 F | 922,5 F | 1083,2 F |
| 4 | 1477,9 F | 1566,2 F | 1672,0 F | 1793,4 F | 2076,3 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Los valores en rojos representan a las demoras superiores comparadas con una intersección semaforizada bajo las mismas condiciones de movimiento y demanda.

Los valores en azul son datos que el programa arrojó como precaución, esto es debido a que la demanda sobrepasó al diseño de la rotonda, generando errores en los resultados. Para obtener buenos resultados se recomienda aumentar el número de carriles de entrada y circulares, para aumentar la capacidad de la rotonda y así satisfacer a la demanda utilizada en esos casos.

C.2.- Análisis intersección semaforizada

Los resultados obtenidos del análisis de la intersección en función de la demanda para cada uno de los casos y aplicando el tiempo de ciclo óptimo se muestran en la Tabla C17 hasta la Tabla C20.

a) Caso 1: 400 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla C17. Demora Intersección Semaforizada con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Intersección semaforizada (SIDRA) | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 13,8 B | 16,0 B | 19,9 B | 24,5 C | 36,1 D |
| 2 | 9,3 A | 10,1 B | 11,8 B | 14,3 B | 18,4 B |
| 3 | 35,1 D | 44,5 D | 58,8 E | 82,8 F | 124,1 F |
| 4 | 45,0 D | 54,3 D | 68,6 E | 92,4 F | 133,6 F |

(Fuente: Elaboración propia)

b) Caso 2: 600 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla C18. Demora Intersección Semaforizada con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Intersección semaforizada (SIDRA) | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 18,6 B | 23,1 C | 30,0 C | 41,2 D | 71,3 E |
| 2 | 10,3 B | 11,5 B | 13,4 B | 17,4 B | 24,3 C |
| 3 | 55,0 E | 77,1 E | 110,8 F | 157,6 F | 211,5 F |
| 4 | 64,8 E | 86,8 E | 120,4 F | 167,1 F | 220,9 F |

(Fuente: Elaboración propia)

c) Caso 3: 800 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla C19. Demora Intersección SemafORIZADA con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Intersección semaforizada (SIDRA) | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 29,4 C | 34,9 C | 57,9 E | 93,9 F | 147,3 F |
| 2 | 12,2 B | 13,0 B | 15,8 B | 21,3 C | 31,9 C |
| 3 | 113,6 F | 136,8 F | 188,4 F | 243,8 F | 300,4 F |
| 4 | 123,2 F | 146,3 F | 197,8 F | 253,2 F | 309,7 F |

(Fuente: Elaboración propia)

d) Caso 4: 1200 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla C20. Demora Intersección SemafORIZADA con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Intersección semaforizada (SIDRA) | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 218,8 F | 262,0 F | 280,7 F | 300,2 F | 362,5 F |
| 2 | 20,5 C | 23,0 C | 27,4 C | 33,4 C | 53,8 D |
| 3 | 333,5 F | 363,0 F | 392,5 F | 422,0 F | 481,4 F |
| 4 | 342,8 F | 372,3 F | 401,7 F | 431,2 F | 490,5 F |

(Fuente: Elaboración propia)

C.3.- Análisis rotonda semaforizada

Desde la Tabla C21 hasta la Tabla C36 se muestran los resultados de la implementación de semáforo en la rotonda para los 4 casos de demanda y en función de los diámetros inscritos. Los valores en rojos son aquellos donde la rotonda funcionaba de manera ineficiente y en estos se realizó la implementación de la rotonda semaforizada.

a) Caso 1: 400 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla C21. Rotonda Semaforizada D= 40 m, con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 40 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A |
| 2 | 7,5 A | 8,5 A | 11,2 B | 11,3 B | 14,5 B |
| 3 | 15,1 B | 18,1 B | 42,8 D | 121,2 F | 212,9 F |
| 4 | 20,2 C | 29,8 C | 131,5 F | 227,1 F | 331,0 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C22. Rotonda Semaforizada D= 50 m, con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 50 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A |
| 2 | 6,2 A | 7,0 A | 8,8 A | 6,4 A | 6,4 A |
| 3 | 14,8 B | 17,2 B | 31,4 C | 89,5 F | 181,8 F |
| 4 | 19,9 B | 27,0 C | 103,8 F | 196,4 F | 292,8 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C23. Rotonda SemafORIZADA D= 60 m, con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 60 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A |
| 2 | 5,1 A | 5,7 A | 7,2 A | 13,7 B | 5,3 A |
| 3 | 14,5 B | 16,5 B | 25,3 C | 82,1 F | 161,5 F |
| 4 | 19,5 B | 25,2 C | 85,7 F | 166,2 F | 261,1 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C24. Rotonda SemafORIZADA D= 80 m, con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 80 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A |
| 2 | 4,1 A | 4,6 A | 5,7 A | 9,2 A | 4,3 A |
| 3 | 13,9 B | 15,4 B | 20,1 C | 57,0 E | 94,0 F |
| 4 | 18,7 B | 23,0 C | 47,4 D | 131,9 F | 212,0 F |

(Fuente: Elaboración propia)

b) Caso 2: 600 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla C25. Rotonda SemafORIZADA D= 40 m, con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 40 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A |
| 2 | 8,6 A | 10,3 B | 11,2 B | 21,4 C | 46,2 D |
| 3 | 18,5 B | 30,7 C | 96,8 F | 186,4 F | 301,0 F |
| 4 | 34,5 C | 179,9 F | 306,4 F | 424,2 F | 548,6 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C26. Rotonda SemafORIZADA D= 50 m, con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 50 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A |
| 2 | 7,0 A | 8,4 A | 11,6 B | 12,8 B | 23,6 C |
| 3 | 17,8 B | 25,7 C | 80,9 F | 159,2 F | 259,3 F |
| 4 | 31,6 B | 146,4 F | 263,0 F | 382,9 F | 503,0 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C27. Rotonda SemafORIZADA D= 60 m, con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 60 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A |
| 2 | 5,8 A | 7,0 A | 10,8 B | 10,1 B | 15,0 B |
| 3 | 17,1 B | 22,9 C | 67,3 E | 148,3 F | 230,4 F |
| 4 | 29,5 C | 120,5 F | 239,6 F | 341,4 F | 471,5 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C28. Rotonda SemafORIZADA D= 80 m, con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 80 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A |
| 2 | 4,7 A | 5,6 A | 7,9 A | 7,6 A | 8,5 A |
| 3 | 16,0 B | 19,9 B | 48,0 D | 117,1 F | 202,7 F |
| 4 | 26,8 C | 66,8 E | 189,0 F | 283,1 F | 395,2 F |

(Fuente: Elaboración propia)

c) Caso 3: 800 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla C29. Rotonda SemafORIZADA D= 40 m, con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 40 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A |
| 2 | 11,9 B | 14,3 B | 30,2 C | 56,6 E | 104,5 F |
| 3 | 57,3 E | 82,8 F | 170,3 F | 274,5 F | 392,3 F |
| 4 | 34,9 F | 353,8 F | 510,1 F | 653,5 F | 793,1 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C30. Rotonda SemafORIZADA D= 50 m, con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 50 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A |
| 2 | 9,8 A | 11,4 B | 23,4 C | 41,4 D | 82,6 F |
| 3 | 43,2 D | 69,9 E | 150,6 F | 251,6 F | 382,0 F |
| 4 | 33,3 C | 312,1 F | 459,3 F | 597,4 F | 755,4 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C31. Rotonda SemafORIZADA D= 60 m, con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 60 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A |
| 2 | 8,2 A | 9,4 A | 18,1 B | 32,1 C | 65,5 E |
| 3 | 34,1 C | 58,2 E | 130,7 F | 229,6 F | 344,5 F |
| 4 | 33,3 C | 292,2 F | 430,5 F | 543,2 F | 696,6 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C32. Rotonda Semaforizada D= 80 m, con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 80 m) | | | | | |
|--------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A |
| 2 | 6,6 A | 7,4 A | 15,6 B | 21,9 C | 42,5 D |
| 3 | 26,5 C | 44,8 D | 102,7 F | 188,8 F | 291,6 F |
| 4 | 32,0 C | 243,4 F | 378,4 F | 447,8 F | 589,1 F |

(Fuente: Elaboración propia)

d) Caso 4: 1200 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla C33. Rotonda Semaforizada D= 40 m, con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 40 m) | | | | | |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A | 6,5 A |
| 2 | 166,5 F | 184,4 F | 207,2 F | 227,5 F | 281,0 F |
| 3 | 340,0 F | 430,5 F | 515,3 F | 554,7 F | 641,4 F |
| 4 | 690,3 F | 766,5 F | 838,4 F | 928,1 F | 1046,0 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C34. Rotonda Semaforizada D= 50 m, con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 50 m) | | | | | |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A | 5,6 A |
| 2 | 145,8 F | 161,2 F | 181,2 F | 204,9 F | 255,4 F |
| 3 | 317,4 F | 422,5 F | 475,6 F | 519,9 F | 604,1 F |
| 4 | 655,1 F | 731,1 F | 798,3 F | 868,0 F | 997,5 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C35. Rotonda Semaforizada D= 60 m, con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 60 m) | | | | | |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A | 4,8 A |
| 2 | 127,6 F | 142,7 F | 161,6 F | 184,9 F | 234,7 F |
| 3 | 279,6 F | 404,4 F | 438,8 F | 477,8 F | 572,4 F |
| 4 | 624,6 F | 699,7 F | 765,2 F | 832,6 F | 947,9 F |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla C36. Rotonda Semaforizada D= 80 m, con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda con semáforo (D= 80 m) | | | | | |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A | 3,6 A |
| 2 | 99,7 F | 113,3 F | 129,7 F | 151,5 F | 196,2 F |
| 3 | 115,6 F | 313,7 F | 392,7 F | 431,8 F | 507,2 F |
| 4 | 573,6 F | 648,7 F | 705,6 F | 773,5 F | 824,2 F |

(Fuente: Elaboración propia)

ANEXO D: RESULTADOS OBTENIDOS EN AIMSUN

D.1.- Simulación rotonda

Los resultados de cola virtual máxima (veh) obtenidos para cada caso de análisis y en función de los diferentes diámetros de la rotonda (40 y 60 m) se muestran a continuación, desde la Tabla D1 hasta la Tabla D8.

a) Caso 1: 400 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla D1. Cola Virtual Máxima Rotonda D=40m con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda | | | | | |
|-------------|------|--------|--------|---------|---------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 0,00 | 0,67 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2 | 0,00 | 0,83 | 2,00 | 163,33 | 781,50 |
| 3 | 0,17 | 0,83 | 230,33 | 916,00 | 1570,67 |
| 4 | 1,00 | 327,33 | 772,17 | 1429,83 | 2051,17 |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla D2. Cola Virtual Máxima Rotonda D=60m con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda | | | | | |
|-------------|------|-------|--------|---------|---------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 0,00 | 0,33 | 0,67 | 0,80 | 0,90 |
| 2 | 0,00 | 0,50 | 1,57 | 3,67 | 220,50 |
| 3 | 0,10 | 0,63 | 50,70 | 611,00 | 1172,00 |
| 4 | 0,85 | 21,33 | 596,50 | 1189,50 | 1920,67 |

(Fuente: Elaboración propia)

b) Caso 2: 600 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla D3. Cola Virtual Máxima Rotonda D=40m con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda | | | | | |
|-------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 1,33 | 2,00 | 2,50 | 3,83 | 6,17 |
| 2 | 1,33 | 2,33 | 3,10 | 548,67 | 1129,17 |
| 3 | 1,50 | 2,63 | 768,33 | 1424,33 | 1988,50 |
| 4 | 332,67 | 920,83 | 1541,50 | 2106,33 | 2979,83 |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla D4. Cola Virtual Máxima Rotonda D=60m con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda | | | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 1,00 | 2,00 | 2,17 | 3,33 | 5,83 |
| 2 | 1,00 | 2,33 | 2,83 | 56,00 | 667,17 |
| 3 | 1,27 | 2,33 | 606,67 | 1127,33 | 1728,17 |
| 4 | 22,00 | 492,50 | 1201,67 | 1779,33 | 2394,67 |

(Fuente: Elaboración propia)

c) Caso 3: 800 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla D5. Cola Virtual Máxima Rotonda D=40m con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda | | | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 2,17 | 2,50 | 2,83 | 4,17 | 6,67 |
| 2 | 2,25 | 2,60 | 108,83 | 724,67 | 1431,67 |
| 3 | 77,27 | 423,43 | 1031,00 | 1642,00 | 2414,17 |
| 4 | 1472,67 | 1660,17 | 2318,50 | 2837,00 | 3430,33 |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla D6. Cola Virtual Máxima Rotonda D=60m con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda | | | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 2,07 | 2,33 | 2,67 | 3,17 | 6,60 |
| 2 | 2,17 | 2,40 | 3,00 | 323,00 | 930,33 |
| 3 | 74,53 | 390,86 | 879,83 | 1488,67 | 2177,50 |
| 4 | 968,00 | 1270,83 | 1855,67 | 2478,17 | 3217,33 |

(Fuente: Elaboración propia)

d) Caso 4: 1200 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla D7. Cola Virtual Máxima Rotonda D=40m con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 3,07 | 3,17 | 4,17 | 4,83 | 7,50 |
| 2 | 310,50 | 610,83 | 836,33 | 1244,17 | 1787,83 |
| 3 | 2567,33 | 2783,17 | 3144,98 | 3452,83 | 4304,17 |
| 4 | 3882,00 | 4221,67 | 4422,00 | 4732,83 | 5572,33 |

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla D8. Cola Virtual Máxima Rotonda D=60m con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Rotonda | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 3,33 | 4,00 | 3,83 | 3,83 | 7,00 |
| 2 | 3,33 | 275,50 | 486,00 | 904,50 | 1359,33 |
| 3 | 2409,83 | 2701,17 | 2979,33 | 3309,00 | 4061,50 |
| 4 | 3464,33 | 3903,67 | 4196,67 | 4520,00 | 5087,17 |

(Fuente: Elaboración propia)

D.2.- Simulación intersección semaforizada

Los resultados obtenidos de cola virtual máxima (veh) para la intersección semaforizada en los diferentes casos se muestran a continuación, desde la Tabla D9 hasta la Tabla D12.

a) Caso 1: 400 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla D9. Cola Virtual Máxima Intersección Semaforizada con 400 veh/hr en Accesos Simétricos

| Intersección semaforizada | | | | | |
|---------------------------|------|--------|--------|--------|---------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 0,00 | 1,00 | 1,67 | 2,00 | 2,50 |
| 2 | 1,17 | 1,50 | 2,17 | 3,33 | 4,67 |
| 3 | 1,33 | 1,50 | 191,83 | 591,33 | 972,67 |
| 4 | 1,57 | 160,00 | 572,33 | 923,83 | 1404,00 |

(Fuente: Elaboración propia)

b) Caso 2: 600 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla D10. Cola Virtual Máxima Intersección SemafORIZADA con 600 veh/hr en Accesos Simétricos

| Intersección semaforizada | | | | | |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 1,17 | 2,00 | 2,50 | 6,00 | 766,67 |
| 2 | 1,67 | 2,50 | 2,50 | 3,83 | 130,33 |
| 3 | 1,70 | 55,67 | 689,33 | 714,83 | 1229,67 |
| 4 | 135,33 | 392,17 | 981,67 | 1636,33 | 2179,00 |

(Fuente: Elaboración propia)

c) Caso 3: 800 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla D11. Cola Virtual Máxima Intersección SemafORIZADA con 800 veh/hr en Accesos Simétricos

| Intersección semaforizada | | | | | |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 2,17 | 2,67 | 3,33 | 355,67 | 927,67 |
| 2 | 2,27 | 2,67 | 2,50 | 3,83 | 37,83 |
| 3 | 95,00 | 437,50 | 1142,17 | 1694,83 | 2279,67 |
| 4 | 817,83 | 1125,67 | 1778,33 | 2474,33 | 2980,00 |

(Fuente: Elaboración propia)

d) Caso 4: 1200 veh/hr en los accesos simétricos

Tabla D12. Cola Virtual Máxima Intersección SemafORIZADA con 1200 veh/hr en Accesos Simétricos

| Intersección semaforizada | | | | | |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mov/Demanda | A | B | C | D | E |
| 1 | 8,67 | 293,67 | 691,50 | 919,17 | 1591,50 |
| 2 | 3,50 | 3,67 | 3,83 | 6,50 | 127,33 |
| 3 | 2584,67 | 2999,67 | 3255,17 | 3622,33 | 4339,67 |
| 4 | 3349,67 | 3652,50 | 4067,00 | 4441,17 | 4979,50 |

(Fuente: Elaboración propia)