



**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“DETERMINACIÓN DE LAS RESTRICCIONES DE TRÁFICO A  
SER APLICADAS EN LA MEJORA DEL FLUJO VEHICULAR DENTRO  
DE UNA CIUDAD VIRTUAL DONDE TODOS LOS SEMÁFOROS  
(DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN APLICADA) HAN SIDO  
SUSTITUIDOS POR ROTONDAS (SISTEMAS DE  
AUTORREGULACIÓN), HACIENDO USO DE UN MODELO DE  
SIMULACIÓN”.**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

presentado ante la

**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO**  
**como parte de los requisitos para optar por el título de**  
**INGENIERO INDUSTRIAL**

REALIZADO POR: ROBLES HURTADO, SOFÍA CARLOTA

PROFESOR GUÍA: DR. HENRY GASPARIN

FECHA: SEPTIEMBRE 2012

**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“DETERMINACIÓN DE LAS RESTRICCIONES DE TRÁFICO A  
SER APLICADAS EN LA MEJORA DEL FLUJO VEHICULAR DENTRO  
DE UNA CIUDAD VIRTUAL DONDE TODOS LOS SEMÁFOROS  
(DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN APLICADA) HAN SIDO  
SUSTITUIDOS POR ROTONDAS (SISTEMAS DE  
AUTORREGULACIÓN), HACIENDO USO DE UN MODELO DE  
SIMULACIÓN”.**

**Este jurado, una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su  
contenido con el resultado: .....**

JURADO EXAMINADOR

Firma: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_

Nombre: \_\_\_\_\_ Nombre: \_\_\_\_\_ Nombre: \_\_\_\_\_

REALIZADO POR: ROBLES HURTADO, SOFÍA  
CARLOTA

PROFESOR GUÍA: DR. HENRY GASPARIN

FECHA: SEPTIEMBRE 2012

A *Dios*, por acompañarme y brindarme oportunidades maravillosas en mi vida que me han ayudado a crecer como persona.

A mi mamá, *Cecilia*, por apoyarme en mi carrera y ser mi hombro, mi fuerza y mi amiga incondicional.

A mi hermano, *Rubén Andrés*, y al resto de mi familia, por su comprensión a lo largo de estos cinco años de carrera.

A mi bue, *Mélida Josefina*, una mujer excepcional y mi ejemplo a seguir.

A mi compañero de tesis de corazón, *Ulises*, por todas tus recomendaciones, ayuda, paciencia y compañía, sin ti este trabajo no fuese lo mismo. Gracias por darme ese empujoncito justo cuando lo necesitaba, por recordarme siempre que todo iba a salir bien.

A mi tutor, *Henry Gasparin*, por tu dedicación, confianza y paciencia. Gracias por haberme ofrecido este Trabajo Especial de Grado, definitivamente al inicio fue un gran reto, ahora puedo decir que es una meta más alcanzada.

Al padrino de la promoción 71, *Alirio Villanueva*, por su gran ayuda, apoyo y palabras de ánimo.

A mis amigas y amigos del CIDI, por brindarme su apoyo y compañía.

A todos mis compañeros con los que compartí durante mi carrera, especialmente a *Matías Arrondo*, una persona brillante y dulce que tuve la dicha de conocer y con quien tuve la oportunidad de formar una gran amistad.

---

**DETERMINACIÓN DE LAS RESTRICCIONES DE TRÁFICO A SER APLICADAS EN LA MEJORA DEL FLUJO VEHICULAR DENTRO DE UNA CIUDAD VIRTUAL DONDE TODOS LOS SEMÁFOROS (DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN APLICADA) HAN SIDO SUSTITUIDOS POR ROTONDAS (SISTEMAS DE AUTORREGULACIÓN), HACIENDO USO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN.**

Autor: Sofía Carlota Robles Hurtado

Tutor: Dr. Henry Gasparin

Año: 2012

**SINOPSIS**

Con el pasar de los años se ha observado un crecimiento exponencial de la población que habita las diferentes ciudades del mundo, las cuales no cuentan con un plan de expansión basado en proyecciones demográficas. Esto da lugar a lo que se conoce como ciudades caóticas, ciudades que no cuentan con el espacio suficiente para sus habitantes ni para los vehículos utilizados para el transporte, no sólo de personas, sino también de productos para la venta y consumo. El resultado de esta situación son calles y avenidas congestionadas, ciudades que cada día tienen más vehículos transportándose por sus redes viales cuya capacidad no varía en función del tiempo ni de los vehículos que transitan por ella. El momento en el que el volumen del tránsito es máximo se conoce como hora pico.

El uso de rotondas y restricciones vehiculares se llevan a cabo con el fin de aligerar la congestión vehicular, y por lo tanto, tratar de disminuir el tiempo que las personas tardan en transportarse de un lugar a otro. Por esta razón, ante una posible mejora del tránsito, se da seguimiento a dos (2) Trabajos Especiales de Grado realizados anteriormente, los cuales coinciden que a través del uso de las rotondas en intersecciones de calles principales, se genera un marcado aumento en el flujo de los vehículos por unidad de tiempo. Tomando como base y partiendo de dichos trabajos, el presente estudio seguirá con la misma línea de investigación, pero con un enfoque diferente, ya que ahora se estudiará el comportamiento de una ciudad virtual donde se empleen diferentes restricciones de tráfico como el Pico & Placa y Carpool .

El estudio se enmarcó como una investigación proyectiva, apoyada en un diseño de investigación no experimental. Los resultados obtenidos indican que la aplicación de restricciones vehiculares a una red vial, ayuda a disminuir el tiempo de recorrido de las entidades que se trasladan a través de una secuencia de ruta.

**PALABRAS CLAVE:** Simulación, Red Vial, Rotondas, Hora Pico, Restricciones Vehiculares (Pico & Placa – Carpool).

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	ii
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	1
ÍNDICE DE ANEXOS .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. ESTUDIO PRELIMINAR .....	3
1.1. Planteamiento del Problema .....	3
1.2. Antecedentes .....	4
1.3. Justificación .....	5
1.4. Objetivos .....	6
1.4.1. Objetivo General .....	6
1.4.2. Objetivos Específicos .....	6
1.5. Alcance .....	6
1.6. Limitaciones.....	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Las Tecnologías Modernas del Tránsito .....	8
2.1.1 El Semáforo.....	8
2.1.2 La Rotonda o Redoma.....	9
2.2 Restricciones Vehiculares .....	12
2.3 La Simulación en el Tráfico Vehicular .....	14
2.3.1 Definición de Tránsito o Tráfico Vehicular .....	15
2.3.1.1 Volumen en la Hora-Pico.....	15

---

2.3.1.2 Composición del Tránsito .....	16
2.3.2 Definición de Simulación.....	16
2.3.3 Etapas de un Modelo de Simulación .....	17
2.3.4 Elementos de un Sistema de Simulación.....	19
2.3.5 Caracterización del Modelo de Simulación .....	19
2.4 Antecedentes del Estudio .....	20
CAPITULO 3. MARCO METODOLÓGICO.....	22
3.1 Tipo de Investigación.....	22
3.2 Fases de la Investigación .....	22
CAPITULO 4. ELABORACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	25
4.1 Ubicación de las Rotondas e Identificación de las Variables .....	25
4.1.1 Diseño y Ubicación de las Rotondas.....	25
4.1.1.1 Variables de diseño de las rotondas .....	25
4.1.1.2 Ubicación de las rotondas .....	27
4.1.2. Variables del Flujo Vehicular .....	28
4.1.2.1 Tamaño de la red y sentido de las calles .....	28
4.1.2.2 Tamaño de las cuadras .....	29
4.1.2.3 Volumen de tráfico vehicular.....	29
4.1.2.4 Velocidad local.....	29
4.1.3 Variable Respuesta del Modelo.....	30
4.1.3.1 Tiempo de recorrido.....	30
4.2 Características del Sistema de Distribución.....	30
4.2.1 Restricciones Vehiculares del Modelo.....	30
4.2.1.1 Carpool.....	30
4.2.1.2 Pico & Placa.....	31

---

4.2.2	Locación del Centro de Distribución y Puntos de Distribución.....	31
4.3	Creación del modelo de simulación.....	32
4.3.1	Breve Descripción del Modelo.....	32
4.3.2	Valores de las Variables.....	34
4.3.2.1	Variables de diseño de las rotondas.....	34
4.3.2.2	Ubicación de las rotondas.....	34
4.3.2.3	Variables del Flujo Vehicular.....	35
4.3.2.4	Variables del sistema de distribución.....	38
4.3.3	Construcción del Modelo Primario.....	39
4.3.3.1	Creación de la red vial.....	39
4.3.3.2	Creación de las rotondas.....	39
4.3.3.3	Creación de las intersecciones.....	41
4.3.3.4	Creación del centro y puntos de distribución.....	41
4.3.3.5	Consideración adicional del modelo primario.....	42
4.3.4	Construcción del Modelo Secundario.....	43
4.3.4.1	Variables creadas.....	43
4.3.4.2	Consideración adicional del modelo secundario.....	44
4.3.5	Verificación del Modelo.....	45
CAPÍTULO 5. DISEÑO Y RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS DEL MODELO.....		46
5.1	Descripción General.....	46
5.1.1	Escenario Uno.....	46
5.1.2	Escenario Dos.....	47
5.1.3	Escenario Tres.....	47
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	49

---

6.1	Análisis de Resultados .....	49
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	54
7.1.	Conclusiones .....	54
7.2.	Recomendaciones .....	55
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56
	ANEXOS	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Metodología para el desarrollo del Trabajo Especial de Grado..	23
Tabla 2. Restricción Pico & Placa de acuerdo a la placa del vehículo.....	31
Tabla 3. Velocidad del Tránsito Vehicular .....	38
Tabla 4. Tiempo de Recorrido en el Escenario 1 .....	46
Tabla 5. Tiempo de Recorrido en el Escenario 2 .....	47
Tabla 6. Tiempo de Recorrido en el Escenario 3 .....	47
Tabla 7. Resultados de la verificación estadística de los diferentes escenarios .....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rotonda.....	10
Figura 2. Señales P-4 (Peligro: Proximidad rotonda), R-1 (Ceda el paso) y R-402 (Sentido giratorio obligatorio).....	12
Figura 3. Medida de Pico & Placa en Colombia, Bogotá para el año 2012. .....	13
Figura 4. Congestión vehicular autopista Francisco Fajardo, Caracas, Venezuela.....	14
Figura 5. Características de una rotonda. ....	26
Figura 6. Ubicación de las rotondas en la ciudad de SUCA. ....	35
Figura 7. Sentido de las calles de la ciudad de SUCA. ....	36
Figura 8. Nombre de las calles y avenidas de la ciudad de SUCA .....	36
Figura 9. Ubicación del C.D. y de los puntos de distribución.....	38
Figura 10. Representación de una calle principal por medio de un Path. .	39
Figura 11. Rotonda Tipo 1. ....	40
Figura 12. Rotonda Tipo 2. ....	40
Figura 13. Intersecciones.....	41
Figura 14. Ciudad de SUCA con su C.D. y puntos de distribución. ....	42
Figura 15. Ubicación de las áreas residenciales. ....	43
Figura 16. Lista de los procesos del Modelo Primario (parte 1 de 2) .....	59
Figura 17. Lista de los procesos del Modelo Primario (parte 2 de 2) .....	59
Figura 18. Lógica para la velocidad en calles principales.....	60
Figura 19. Lógica para la velocidad en calles secundarias .....	60
Figura 20. Lógica para los Vehículos Tipo B al entrar al área residencial	61

---

Figura 21. Lógica para asignar la variable respuesta a las entidades marcadoras .....	61
Figura 22. Lógica para asignar el día de la semana al modelo.....	61
Figura 23. Lógica entrada a los estacionamientos al aplicar el Pico & Placa (parte 1 de 2) .....	62
Figura 24. Lógica entrada a los estacionamientos al aplicar el Pico & Placa (parte 2 de 2) .....	62
Figura 25. Lógica EndTransfer de las entidades de tráfico al entrar al estacionamiento.....	63
Figura 26. Lógica vaciado de los estacionamientos .....	63
Figura 27. Lógica de la Hora Pico a la ciudad de SUCA (parte 1 de 2) ...	63
Figura 28. Lógica de la Hora Pico a la ciudad de SUCA (parte 2 de 2) ...	64
Figura 29. Lógica de las rotondas del modelo .....	64
Figura 30. Lógica de las intersecciones del modelo.....	64
Figura 31. Escenario Uno Vehículo Tipo A - Escenario Dos Vehículo Tipo A.....	65
Figura 32. Escenario Uno Vehículo Tipo A - Escenario Tres Vehículo Tipo A .....	65
Figura 33. Escenario Dos Vehículo Tipo A - Escenario Tres Vehículo Tipo A.....	66
Figura 34. Escenario Uno Vehículo Tipo B - Escenario Dos Vehículo Tipo B .....	66
Figura 35. Escenario Uno Vehículo Tipo B - Escenario Tres Vehículo Tipo B .....	67
Figura 36. Escenario Dos Vehículo Tipo B - Escenario Tres Vehículo Tipo B .....	67
Figura 37. Escenario Control Vehículo Tipo A - Escenario Uno Vehículo Tipo A .....	68

---

Figura 38. Escenario Control Vehículo Tipo A - Escenario Dos Vehículo Tipo A .....	68
Figura 39. Escenario Control Vehículo Tipo A - Escenario Tres Vehículo Tipo A .....	69
Figura 40. Escenario Control Vehículo Tipo B - Escenario Uno Vehículo Tipo B .....	69
Figura 41. Escenario Control Vehículo Tipo B - Escenario Dos Vehículo Tipo B .....	70
Figura 42. Escenario Control Vehículo Tipo B - Escenario Tres Vehículo Tipo B .....	70

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Tiempo de recorrido en el Escenario Uno.....	50
Gráfica 2. Tiempo de Recorrido en el Escenario Dos.....	51
Gráfica 3. Tiempo de Recorrido en el Escenario Tres .....	52
Gráfica 4. Comparación de los Tiempos de Recorrido de los Escenarios	53

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Procesos del Modelo Primario.....	59
Anexo 2. Disminución de Velocidades en Calles Principales y Secundarias .....	60
Anexo 3. Restricción de las Áreas Residenciales.....	61
Anexo 4. Asignación de la Variable Respuesta .....	61
Anexo 5. Asignación del Día de la Semana .....	61
Anexo 6. Procesos del Modelo Secundario.....	62
Anexo 7. Rotondas e Intersecciones.....	64
Anexo 8. Verificación Estadística de los Resultados .....	65

## INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Especial de Grado forma parte de una línea de investigación que busca determinar cuáles son las restricciones de tráfico aplicables para mejorar el flujo vehicular dentro de una ciudad virtual donde todos los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) han sido sustituidos por rotondas (sistemas de autorregulación), haciendo uso de un modelo de simulación representativo de una red vial. Se generará de manera aleatoria una secuencia de ruta que deberán seguir las entidades marcadoras en los diferentes escenarios. Estos últimos estarán conformados por dos (2) restricciones: Pico & Placa y Carpool. Se seleccionará el escenario que presente el menor valor en la variable respuesta representada por el tiempo de recorrido.

La estructura del trabajo se detalla a continuación:

**Capítulo 1. Estudio Preliminar:** Contiene el planteamiento del problema, los antecedentes de la investigación, la justificación, los objetivos, el alcance y las limitaciones del presente Trabajo Especial de Grado.

**Capítulo 2. Marco Teórico:** Presenta todos los términos y definiciones necesarias para la adecuada comprensión del presente estudio. Se destacan las tecnologías modernas usadas en el tráfico, las restricciones vehiculares, la simulación en el tráfico vehicular y los antecedentes del Trabajo Especial de Grado.

**Capítulo 3. Marco Metodológico:** Detalla el tipo de investigación utilizada, sus fases y la operacionalización de los objetivos.

**Capítulo 4. Elaboración del Modelo de Simulación:** Constituye la primera fase del estudio. Determina la ubicación de las rotondas e identificación de las variables, las características del sistema de distribución y la creación del modelo.

**Capítulo 5. Diseño y Resultados de los Escenarios del Modelo:** Representa la segunda fase del estudio. Contiene la descripción de los tres (3) escenarios realizados en el modelo y los resultados correspondientes a dichos escenarios.

**Capítulo 6. Análisis de Resultados:** Constituye la tercera fase del estudio. Presenta tanto el análisis individual de los resultados obtenidos de los diferentes escenarios como también un análisis comparativo entre dichos escenarios.

**Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones:** Representa la cuarta fase del estudio. Contiene el mejor escenario tomando como base la variable respuesta representada por el tiempo de recorrido de las entidades marcadoras. De igual forma, recomendaciones para posteriores trabajos que se enmarquen dentro de la misma línea de investigación.

## CAPÍTULO 1. ESTUDIO PRELIMINAR

El contenido de este capítulo presenta el planteamiento del problema del Trabajo Especial de Grado como también los antecedentes de la investigación, justificación, objetivos, alcance y limitaciones.

### 1.1. Planteamiento del Problema

Hoy en día las ciudades se han convertido en el principal centro de las actividades económicas, atrayendo, de esta manera, a la población proveniente de zonas urbanas, lo cual genera como consecuencia una mayor movilización por las vías terrestres. No sólo se transportan personas, sino todos aquellos productos para la venta y consumo. La necesidad de hallar las herramientas pertinentes y correctas que logren disminuir el tráfico vehicular de las ciudades es elemental para el máximo provecho de las vías públicas.

La congestión que se observa en el tráfico vehicular es reflejo del crecimiento exponencial del número de automóviles que transitan en las ciudades de todo el mundo, como consecuencia del aumento de la población. La aparición de nuevos vehículos, aunado al hecho de que las ciudades no cuentan con un plan de expansión basado en las proyecciones demográficas, da lugar a ciudades caóticas, caracterizadas por la falta de espacio para sus habitantes.

Las restricciones de tráfico son medidas que se implementan para agilizar el flujo vehicular y aligerar la congestión que se produce principalmente durante las horas pico (horarios con mayor afluencia de tráfico) en las vías públicas. Uno de los sistemas utilizados comúnmente se conoce como *Carpool*, el cual consiste en trasladar a un grupo de personas que se dirigen a un mismo destino dentro de un automóvil. Otro sistema, es controlar el flujo vehicular según el último número de placa del automóvil. A cada día de la semana se le asigna un número del cero (0) al nueve (9) y aquel transporte cuya placa finalice en dicho número, tendrá prohibido transitar durante ese día por la vía pública. El desacato de dicha norma acarreará una amonestación o multa.

En algunas ciudades del mundo se han realizado cambios respecto a los mecanismos de regulación aplicada, utilizando rotondas o dispositivos de autorregulación en su lugar para agilizar el tráfico vehicular. La rotonda consiste en una plaza con una vía circular alrededor a la que se unen distintas vías. Este sistema posee la ventaja que funciona como un auto regulador de la velocidad de los vehículos que transitan a través de ella, evitando que éstos superen una velocidad específica y sucedan volcamientos. Las reglas básicas que se deben cumplir en una rotonda son:

- El sentido de giro es anti-horario en los países en que se conduce del lado derecho de la vía y el sentido de giro es horario en los demás países.
- Los vehículos ubicados dentro de la rotonda tienen prioridad de circulación.
- Los vehículos deben utilizar los carriles internos para facilitar la incorporación de los demás conductores una vez que se encuentren dentro de la rotonda y no vayan a tomar la próxima salida.
- El conductor deberá ubicarse primero en el carril externo si está circulando por un carril interior y desea salir de la rotonda.

Cada usuario de la red vial tiene la facultad de tomar decisiones acerca de la ruta que desea tomar, basándose bien sea en el costo, tiempo, comodidad y seguridad. Esto recibe el nombre de flujo vehicular. El conductor decide cuándo y cómo recorrer la ruta que considere óptima.

Por todo lo antes expuesto surge la siguiente interrogante:

¿Se puede mejorar un sistema de distribución empleando una combinación de restricciones de tráfico?

La respuesta a esta interrogante, constituye la razón de ser de la presente investigación.

## **1.2. Antecedentes**

Anteriormente se han desarrollado dos (2) Trabajos Especiales de Grado relacionados con el presente trabajo. El primero fue elaborado por Armas, D.

(2011) Determinación de los cambios que se producen en una ruta de distribución cuando se sustituyen los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) por rotondas (dispositivos de autorregulación) en una ciudad virtual, haciendo uso de un modelo de simulación. Trabajo Especial de Grado como parte de los requisitos para optar por el título de Ingeniero Industrial. Universidad Católica Andrés Bello. Sede Montalbán: Caracas, Venezuela. La conclusión principal del trabajo mencionado anteriormente fue que la sustitución de semáforos por rotondas en las intersecciones genera un marcado aumento en el flujo de vehículos por unidad de tiempo, aun manteniéndose la misma velocidad de desplazamiento de los mismos. El segundo fue desarrollado por Valsecchi, A. y Marín, D. (2011) Determinación de las mejores rutas de distribución dentro de una ciudad virtual donde todos los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) han sido sustituidos por rotondas (dispositivos de autorregulación), haciendo uso de un modelo de simulación. Trabajo Especial de Grado como parte de los requisitos para optar por el título de Ingeniero Industrial. Universidad Católica Andrés Bello. Sede Montalbán: Caracas, Venezuela. Las principales conclusiones obtenidas del trabajo fueron las siguientes: coincidiendo con el trabajo de Daniela Armas no existe la necesidad de colocar rotondas en intersecciones seguidas; sino, por ejemplo, en aquellas ubicadas entre calles principales y, al asignar una secuencia de ruta al modelo de simulación, se logra disminuir el tiempo de recorrido para la entidad de transporte dentro de la ciudad virtual. En dicho trabajo se utilizó un algoritmo de ruta óptima.

Tomando como base y partiendo de estos Trabajos Especiales de Grado, el presente trabajo seguirá con la misma línea de investigación, pero con un enfoque diferente, ya que ahora se estudiará el comportamiento de una ciudad virtual donde se empleen diferentes restricciones de tráfico para lo cual es necesario desarrollar un nuevo modelo de simulación.

### **1.3. Justificación**

Ante una posible mejora del tránsito de las vías públicas sustituyendo todos los semáforos por rotondas y aplicando restricciones de tránsito que aligeren el flujo vehicular, es trascendental como futuros ingenieros avocarse al estudio y

desarrollo de nuevas alternativas, siendo esta línea de investigación una oportunidad para dar un significativo aporte en esta área.

El presente Trabajo Especial de Grado permite utilizar todas las herramientas necesarias para el desarrollo de la investigación haciendo uso de los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera. De igual manera, abre las puertas al aprendizaje y a la aplicación de la metodología con el fin de realizar investigaciones científicas; por lo tanto, es básico para la formación de profesionales capaces y proactivos que se caractericen por su audacia de innovar. Es posible que este trabajo constituya una posible solución al problema que se refleja en el tráfico vehicular, tanto en Venezuela, como en otras ciudades del mundo.

## **1.4. Objetivos**

### ***1.4.1. Objetivo General***

Determinar cuáles son las restricciones de tráfico aplicables para mejorar el flujo vehicular dentro de una ciudad virtual donde todos los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) han sido sustituidos por rotondas (sistemas de autorregulación), haciendo uso de un modelo de simulación.

### ***1.4.2. Objetivos Específicos***

I.4.2.1. Generar un modelo de simulación representativo de una ciudad virtual con rotondas en lugares específicos según los estudios anteriores.

I.4.2.2. Generar una ruta de distribución a modo de prueba.

I.4.2.3. Generar escenarios de combinación de restricciones de tráfico.

I.4.2.4. Analizar comparativamente los escenarios de ruta al realizar la combinación de restricciones de tráfico.

I.4.2.5. Seleccionar el mejor escenario y verificar estadísticamente los resultados

## **1.5. Alcance**

El desarrollo de este Trabajo Especial de Grado se llevará a cabo mediante un estudio de los procesos involucrados en los sistemas de distribución. Este trabajo de investigación propone generar una herramienta de simulación que permita obtener la mejor combinación de restricciones de tráfico en una ciudad

virtual, haciendo uso de un algoritmo heurístico ya existente para la determinación de la ruta de distribución.

Se propone que la ciudad virtual en la que se basará el proyecto conste de un mínimo de cuatro (4) avenidas principales doble vía y siete (7) transversales de una vía donde se deben cumplir restricciones de tránsito.

### **1.6. Limitaciones**

Considerando que el presente Trabajo Especial de Grado es un trabajo conceptual, no se contempla la implementación de los resultados obtenidos. De igual forma, los datos utilizados para el modelo de simulación, no provienen de hechos reales sino de supuestos estadísticos y de las conclusiones derivadas de los Trabajos Especiales de Grado mencionados anteriormente en los antecedentes.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se hablará acerca de las tecnologías modernas usadas en el tráfico, las restricciones vehiculares, la simulación en el tráfico vehicular y los antecedentes del estudio.

### **2.1 Las Tecnologías Modernas del Tránsito**

En todas las civilizaciones conocidas por el ser humano ha existido un elemento en común, un elemento que ha prevalecido entre ellas, representado por el conjunto de reglas y normas que los ciudadanos deben seguir y cumplir para vivir en armonía, bien sea dentro de su comunidad, urbanización o ciudad. A partir del siglo XVIII con la creación de los primeros automóviles por motor de combustión interna con gasolina, la gente empieza a trasladarse a través de carreteras, ahorrando tiempo y aumentando la comunicación entre lugares distantes. La invención de este medio de transporte trajo como consecuencia una serie de brillantes ideas para comenzar a regular el tráfico y así disminuir el flujo vehicular.

#### ***2.1.1 El Semáforo***

El ingeniero especialista en señales de ferrocarril, J.P. Knight, en el mes de diciembre de 1868 inventa el primer semáforo con luces destinado al tránsito, artefacto instalado en el exterior del Parlamento británico de Westminster. Sin embargo, según (Summers & Summers G, 2011) “fue corta su existencia porque se prescindió del artilugio y hasta un tiempo más tarde no se retomó la idea de su desarrollo, coincidiendo con la aparición del automóvil”. No es hasta el 4 de agosto de 1914 que se instala el primer semáforo moderno en Cleveland, Estados Unidos, el cual constaba sólo de dos luces, verdes y rojas. Posteriormente, se incorpora una tercera luz de color ámbar. Los semáforos de tres luces aparecieron en el año de 1920 en las calles de Detroit y en la Quinta Avenida de la ciudad de Nueva York. En 1953 surgen los primeros semáforos eléctricos; su uso se fue expandiendo hasta el continente Europeo, cuyas calles empezaron a iluminarse con luces tricolores.

Se entiende por semáforo todo dispositivo eléctrico cuya función es ordenar y regular el tránsito de vehículos y peatones en calles y carreteras por medio de luces generalmente de color rojo, amarillo y verde, operados por una unidad de control. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones P. , 2000). Entre las funciones que este dispositivo cumple se encuentran:

- Interrumpir periódicamente el tránsito para permitir el paso de otra corriente vehicular o peatonal.
- Regular la velocidad de los vehículos para mantener la circulación continua.
- Controlar la circulación por los canales.

### ***2.1.2 La Rotonda o Redoma***

Tomando en consideración las grandes variaciones de los patrones de tránsito, no siempre los semáforos representan la mejor solución para la congestión vehicular, por lo que su instalación puede que no sea necesaria. Es por esta razón, que surge un nuevo dispositivo de regulación del tráfico conocido como rotonda, intersección giratoria o redoma (ver figura 1), excelente ejemplo de una convención civilizada.

Para finales del siglo XIX, en las grandes ciudades europeas ya existían problemas de tráfico como consecuencia del número elevado de vehículos que transitaban. Dicho evento, trajo como consecuencia un gran congestionamiento en las vías urbanas, sobre todo en las intersecciones, ya que para la época no existía una regulación de la circulación vehicular o bien, porque las intersecciones colapsaban llegando al límite de su capacidad. Como solución a dicha saturación, ingenieros ingleses generaron por primera vez la concepción de una intersección giratoria para resolver los problemas antes mencionados. Sin embargo, parece que éste mérito se debe al arquitecto francés Eugène Hénard quien trabajando en el servicio de arquitectura de la ciudad de París, proyectó las primeras rotondas urbanas. Paralelo a este hecho, el urbanista William Phelps Eno propone para el año de 1903 un sistema de circulación giratorio en un solo sentido alrededor del Columbus Circle ubicado en la ciudad de Nueva York. Indudablemente, ambos

urbanistas llegaron a la misma solución de manera independiente, defiriendo sólo en el tamaño del islote central. (Dirección de Ministerio de Transporte, 2000)

La rotonda consiste en un tipo especial de nudo o intersección dotada de un obstáculo central, materialmente infranqueable y rodeado por una calzada anular con sentido de circulación giratoria a derechas sobre la que confluyen varias calles; se rige por una regla especial de prioridad según la cual los vehículos que pretendan entrar en la calzada anular deben ceder el paso a los que ya se encuentran en ella. (Ayuntamiento de Madrid, 2000). Es importante destacar que la rotonda es una intersección a nivel, ya que representa una confluencia de varias vías a través de la cual el tráfico se mueve en diversas direcciones. (Department of Transportation, 2008).

Las redomas “se caracterizan por suprimir los cruces rectos e izquierdos, sustituyéndolos por maniobras convergentes y divergentes alrededor de una isla central”. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 1997)



Figura 1. Rotonda.

Fuente: (González, 2003)

Según (Dirección de Ministerio de Transporte, 2000) los elementos que integran la rotonda son:

- **Anillo de Circulación o Calzada Anular:** Zona generalmente asfaltada comprendida entre el diámetro exterior de la rotonda y el islote central.

Esta área de intersección recoge el tráfico entrante en la intersección y lo reconduce hacia las salidas, lo cual obliga a los vehículos a seguir una circulación giratoria en un único sentido hasta que abandonan la intersección por una de sus salidas. La anchura de este anillo debe ser constante.

- **Islote Central:** Zona que no está destinada a la circulación de vehículos comprendida en el interior del anillo de circulación, de manera tal que la calzada anular lo bordea. En la mayoría de los casos, su forma es circular, y en algunos casos oval o elíptica. Entre las funciones que este elemento cumple se encuentra el representar un obstáculo en la dirección que llevan las vías que se aproximan a la intersección, razón por la cual, surge una reducción de la velocidad de los automóviles.
- **Entradas:** Es la zona de la vía que desemboca en la intersección y que está separada de ésta por la línea de ceda el paso (Darder, 2005). El diseño de una entrada debe, por un lado, incitar a los usuarios a reducir la velocidad de aproximación a la rotonda y, por otro, permitir el paso del tráfico con una buena fluidez. El número de carriles en la entrada depende de las previsiones de tráfico y el contexto de la intersección, como lo son las condiciones del lugar o tipo de vía.
- **Salidas:** El diseño de la salida debe permitir que los vehículos que circulan por el anillo puedan abandonarlo sin producir ninguna alteración en el resto del flujo vehicular que circulan por él, todo esto también sin incitar a un aumento de la velocidad al abandonar la calzada anular. De acuerdo a la importancia del tráfico se pueden realizar salidas con uno ó dos carriles.
- **Señalización:** Su finalidad principal es advertir la proximidad de la rotonda, de las condiciones extraordinarias de circulación y la prioridad de los vehículos dentro de ella, también orientar sobre los posibles destinos o direcciones que se pueden tomar, además de balizar los islotes deflectores, el islote central y los límites de la rotonda (ver figura 2).

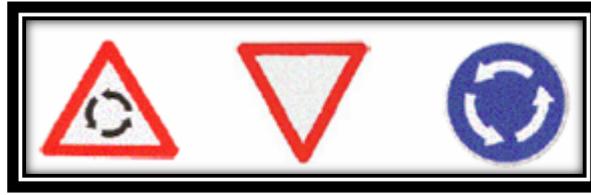


Figura 2. Señales P-4 (Peligro: Proximidad rotonda), R-1 (Ceda el paso) y R-402 (Sentido giratorio obligatorio).

Fuente: (Dirección de Ministerio de Transporte, 2000)

## 2.2 Restricciones Vehiculares

La congestión vehicular presente en las vías terrestres ha traído como consecuencia no sólo el uso de rotondas, sino también el uso de la Gestión de la Demanda de Transporte (G.D.T.), conocida en inglés como Traffic Demand Management (T.D.M.), cuyo principio se fundamenta en influir en la conducta de los individuos al transportarse. Según (Ison, Meyer, & Rye, 2008), la G.D.T. puede ser entendida como cualquier acción o grupo de acciones dirigidas a influir en el comportamiento de las personas al transportarse, de tal manera que diversas opciones o medidas de movilización son presentadas y por lo tanto, la congestión es reducida. Una de las medidas más comunes de la G.D.T. es el uso de restricciones de tránsito dentro de las zonas urbanas, las cuales prohíben la circulación de vehículos, bien sea, por un tiempo o lugar determinado durante las horas pico, adjetivo que se refiere al período de tiempo donde la cantidad de vehículos aumenta y se produce una elevada congestión en las vías.

Desde países del continente europeo como Italia y el Reino Unido, hasta Colombia, Brasil, Chile y Venezuela ubicados en Latinoamérica, el uso de automóviles no sólo es un factor común, sino que aumenta en todas sus calles y avenidas. La tasa anual de crecimiento de vehículos en Venezuela es 1,1 aproximadamente. “La situación normal en las calles de la ciudad, que se podría caracterizar como coche más peatón, cambió claramente a favor del coche...el coche domina la calle mientras los seres humanos son desplazados” (Cal y Mayor & Cárdenas, 2000). Una de las posibles soluciones a dicha problemática es la aplicación de restricciones vehiculares, las cuales deben ser cumplidas, sin excepción, por todos los conductores bajo los términos y condiciones que las autoridades decretan. Por ejemplo, el transporte de más una (1) persona dentro de

un vehículo se conoce como Carpool. Esta restricción se suele emplear por aquellos ciudadanos que se dirigen a un mismo destino y deciden realizar, bien sea su viaje al trabajo o a la universidad, en compañía de otras personas, generando una marcada disminución en el número de vehículos que circulan por las vías terrestres.

El Plan Pico & Placa (ver figura 3) es otra restricción que representa una limitación en los horarios de circulación de los carros particulares en base al número de placa del vehículo para aliviar la congestión de las vías. En otras palabras, es una medida utilizada para reducir el flujo de vehículos particulares en días de la semana, previamente establecidos e informados a la comunidad, de acuerdo al último número en que termine la placa del carro. (Moller, 2006)



Figura 3. Medida de Pico & Placa en Colombia, Bogotá para el año 2012.

Fuente: Código Nacional de Tránsito de Colombia 2012.

En el año 2008 en la capital de Venezuela, Caracas, se implantó el plan Pico & Placa tanto en el Municipio de Baruta como en el Municipio de Chacao; en el último mencionado, se obtuvo una disminución del 40% en el tiempo de recorrido por el mismo durante el plan piloto realizado según (Rodríguez, 2008). El principal objetivo de la Alcaldía al efectuar este cambio en las horas de circulación de los vehículos, era disminuir el flujo vehicular, y mejorar de esta manera el problema de tráfico en Caracas (ver figura 4). Se aplicó en horas de la mañana y horas de la tarde, ya que según el Alcalde para el momento, Leopoldo

López “el flujo vehicular en el Municipio Chacao se mantiene constante durante todo el día, al igual que en toda la ciudad, no se comporta con picos... hay una situación de tráfico y de congestión desde las 6:00 am hasta las 7:00 pm, todo el día hay comportamiento de alta densidad vehicular”. A pesar de los buenos resultados y el apoyo por parte de la mayoría de los ciudadanos, dicha restricción vehicular fue suspendida por decisión del Tribunal Supremo de Justicia.



**Figura 4. Congestión vehicular autopista Francisco Fajardo, Caracas, Venezuela.**

Fuente: (Garzón & Torrealba, 2010)

### **2.3 La Simulación en el Tráfico Vehicular**

Todo sistema o proceso de la vida real, como lo es el tráfico de una ciudad virtual y las restricciones que se deseen aplicar al mismo, se pueden estudiar a través de la simulación por computadora; este software imita las operaciones o características del sistema, a menudo en el transcurso del tiempo, y emplea una serie de métodos para estudiar variedad de modelos de sistemas del mundo real mediante la evaluación numérica.

La simulación en computadora es una herramienta de investigación de operaciones, valiosa y de amplio uso a nivel mundial, que permite evaluar

elementos claves para el éxito de una empresa o sociedad, como por ejemplo los tiempos, los costos, el porcentaje de utilización y las colas. La simulación se emplea con el fin de estudiar un sistema o proceso de la vida real a través de un modelo representativo que incluya las variables que afectan su desarrollo, razón por la cual se logra obtener un resultado que bien, resolverá una problemática en particular, o brindará opciones de mejora que beneficien al sistema o proceso en estudio. Su principal objetivo consiste en comprender, analizar y mejorar las condiciones de operaciones relevantes del sistema. Al ser un programa que se ejecuta en una computadora, no es necesario llevar a cabo los cambios, usualmente costosos y hasta difíciles en la vida real, sin antes analizarlos y saber a ciencia cierta si son convenientes o no. “En estos días, la simulación es más popular y poderosa que nunca, ya que las computadoras y el software son mejores de los que nunca han existido”. (Kelton, Sadowski, & Sturrock, 2008)

### ***2.3.1 Definición de Tránsito o Tráfico Vehicular***

El tránsito o tráfico vehicular permite definir la calidad de servicio que una vía, en particular y definida previamente, prestará a sus usuarios. El tránsito promedio diario, cuyas siglas se definen con las letras T.P.D., expresa el volumen de tránsito y es el resultado de dividir el número total de vehículos que circulan por un área determinada durante el lapso de un (1) año. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 1997)

#### ***2.3.1.1 Volumen en la Hora-Pico***

Para poder obtener las variaciones que sufre el tránsito no es suficiente el T.P.D. realizado durante un (1) día, sino en períodos de tiempo más cortos como una (1) hora por ejemplo. De esta forma se realizan conteos del tránsito durante las 24 horas que conforman un día por un período de siete (7) días. Por medio de este conteo se logran distinguir las horas en las cuales el volumen del tránsito es máximo, conocido como horas pico. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 1997)

### *2.3.1.2 Composición del Tránsito*

Dada la diferencia existente en las características de operación de cada vehículo su influencia es directa en el flujo del tránsito. Esto se puede observar de manera clara en los vehículos de carga, los cuales al ser más pesados y de mayor tamaño no sólo ocupan más espacio en la vía sino que también transitan más lento.

Los vehículos se dividen en dos grandes grupos:

- Vehículos Livianos: Vehículos de dos (2) ejes y cuatro (4) ruedas. Como ejemplo se tienen los autos tipo sedán o limosina.
- Vehículos Pesados: Vehículos con más de cuatro (4) ruedas. Como ejemplo se tienen a los camiones, autobuses y remolques.

Durante las horas pico el porcentaje de camiones disminuye en las vías a medida que aumenta el de vehículos livianos. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 1997)

### *2.3.2 Definición de Simulación*

La simulación es un término muy amplio que se refiere al planteamiento y resolución de problemas. En algunos casos, simular un sistema requiere de una historia artificial, cuyo análisis permitirá inferir las características del sistema real. Otro concepto según (Shannon, 2003) establece que la “simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo, con el propósito de entender el comportamiento del sistema, o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el mismo”.

Hoy en día se utiliza esta herramienta en la fase de diseño de grandes empresas, convirtiéndose de esta manera en un instrumento estándar que provee control en tiempo real. De acuerdo a Kelton et al. se pronostica que para el futuro, a través del uso de la simulación se logre realizar plantillas especializadas para cada tipo de industria, diseño y análisis estadístico automatizado y un máximo provecho de la interconexión entre sistemas. Sin embargo, el valor de la simulación no siempre fue este.

### 2.3.3 Etapas de un Modelo de Simulación

Según (Cárdenas, García, & García, 2006) las etapas de un proyecto de simulación son:

- **Definición del sistema bajo estudio:** En esta etapa es fundamental conocer el sistema a modelar. Por esta razón, se requiere saber qué origina el estudio de simulación y establecer los supuestos del modelo. Se debe definir con claridad las variables de decisión del modelo, determinar las interacciones entre éstas y establecer con precisión los alcances y limitaciones que aquel podría llegar a tener.
- **Generación del modelo de simulación base:** Una vez definido el sistema en términos de un modelo conceptual, el siguiente paso consiste en la generación de un modelo de simulación base. No es necesario que este modelo sea demasiado detallado, pues se requiere mucha más información estadística sobre el comportamiento de las variable de decisión del sistema. La generación de este modelo es el primer reto, ya que se debe traducir a un lenguaje de simulación la información que se obtuvo en la etapa de definición del sistema.
- **Recolección y análisis de datos:** En esta etapa se debe determinar qué información es útil para la determinación de las distribuciones de probabilidad asociadas a cada una de las variables aleatorias necesarias para la simulación.
- **Generación del modelo preliminar:** En esta etapa se integra la información obtenida a partir del análisis de datos, los supuestos del modelo y todos los datos que se requieran para tener un modelo lo más cercano posible a la realidad del problema bajo estudio.
- **Verificación del modelo:** Una vez que se han identificado las distribuciones de probabilidad de las variables del modelo y se han implantado los supuestos acordados, es necesario realizar un proceso de verificación de datos para comprobar la propiedad de la programación del modelo, y comprobar que todos los parámetros usados en la simulación funcionen correctamente.

- **Validación del modelo:** El proceso de validación del modelo consiste en realizar una serie de pruebas al mismo, utilizando información de entrada real para observar su comportamiento y analizar resultados.
- **Generación del modelo final:** Una vez que el modelo se ha validado, el analista está listo para realizar la simulación y estudiar el comportamiento del proceso. En caso de que se desee comparar escenarios diferentes para un mismo problema, tal como sucede en el presente Trabajo Especial de Grado, éste será el modelo raíz.
- **Determinación de los escenarios para el análisis:** Tras validar el modelo es necesario establecer los escenarios que se quieren analizar en base al objetivo general que se desea cumplir.
- **Análisis de sensibilidad:** Una vez que se obtienen los resultados de los escenarios es importante llevar a cabo pruebas estadísticas que permitan comparar los escenarios con los mejores resultados finales. Si dos de ellos tienen resultados similares, será necesario comparar sus intervalos de confianza respecto a la variable de respuesta final. Si no hay intersección de intervalos se podrá decir con certeza estadística que los resultados no son iguales; sin embargo, si los intervalos se traslapan, será imposible determinar estadísticamente hablando, que una solución es mejor que otra. Si se desea obtener un escenario “ganador” en estos casos, será necesario realizar más réplicas de cada modelo y/o incrementar el tiempo de simulación de cada corrida.
- **Documentación del modelo, sugerencias y conclusiones:** La documentación es muy importante, pues permitirá el uso del modelo generado en caso de que se requieran ajustes futuros. De igual forma, con el propósito de ejecutar un reporte más completo, se deben realizar sugerencias tanto del uso del modelo como sobre los resultados obtenidos. Por último, se deben presentar las conclusiones del proyecto de simulación, a partir de las cuales es posible obtener los reportes ejecutivos para la presentación final, en este caso, la defensa del Trabajo Especial de Grado.

### *2.3.4 Elementos de un Sistema de Simulación*

Según Kelton et al. los componentes más importantes de un sistema son:

- **Entidad:** Representación de los flujos de entrada a un sistema; éste es el elemento responsable de que el estado del sistema cambie.
- **Atributo:** Valores asignados a cada entidad que pueden ser modificados durante la simulación. Un atributo es una característica común de todas las entidades, pero con un valor específico que puede diferir entre las entidades.
- **Variable:** Valores globales que pueden ser modificados y afectan todo el modelo de simulación. En otras palabras, es información que refleja alguna característica del sistema, sin importar cuántos o qué tipos de entidades haya alrededor. A diferencia de los atributos, las variables no están unidas a ninguna entidad específica, sino más bien pertenece al sistema en su conjunto.
- **Recurso:** Elementos que procesan las entidades y que dependiendo de su capacidad pueden generar colas. Son dispositivos necesarios para llevar a cabo una operación.
- **Cola:** Generalmente el lugar en el que permanecen las entidades antes de ser atendidas por un recurso.

### *2.3.5 Caracterización del Modelo de Simulación*

El modelo de simulación empleado para el desarrollo del Trabajo Especial de Grado es dinámico, estocástico y discreto; ya que según (Cárdenas, García, & García, 2006) estos modelos son aquellos en los que el estado del sistema que se está analizando cambia respecto al tiempo, tienen parámetros aleatorios y las variables de estado cambian en instantes discretos de tiempo, respectivamente.

Un desarrollo de software de simulación dinámico, estocástico y discreto es Simio, creado en el 2006 por el Dr. Dennis Pegden, también conocido por haber sido uno de los creadores de ARENA. Esta nueva plataforma se basa en objetos inteligentes y en un entorno gráfico 3D para el desarrollo de modelos de simulación de diversos sistemas que van desde fábricas, cadenas de suministro y

aeropuertos, hasta sistemas de servicio. Los objetos pueden ser utilizados de manera fácil en otros modelos ajenos a aquel en donde se originó, razón por la cual SIMIO permite desarrollar rápidamente modelos de sistemas complejos. (SIMIO, 2012)

SIMIO cuenta con una interfaz moderna que permite a sus usuarios aprender a usar la herramienta de forma más fácil y rápida. En contraste, muchos de los productos de simulación que se encuentran en el mercado hoy en día tienen más de 10 años de uso, por lo cual sus tradicionales interfaces no son de manejo tan sencillo. (SIMIO, 2012)

## 2.4 Antecedentes del Estudio

Existen dos antecedentes de investigación relacionados directamente con el presente Trabajo Especial de Grado:

- El primero fue “Determinación de los cambios que se producen en una ruta de distribución cuando se sustituyen los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) por rotondas (dispositivos de autorregulación) en una ciudad virtual, haciendo uso de un modelo de simulación”. (Armas, 2011)<sup>1</sup> Dicho trabajo consistió en generar un modelo de simulación representativo de una ciudad virtual con semáforos, para luego, determinar la ruta de distribución dentro de la misma a través del uso de un algoritmo heurístico ya existente. Posteriormente, se procedió a reemplazar en el modelo los semáforos por rotondas con el fin de analizar de forma comparativa la variación del sistema de distribución tras dicha sustitución. La conclusión principal del trabajo mencionado fue que la sustitución de semáforos por rotondas en las intersecciones genera un marcado aumento en el flujo de vehículos por unidad de tiempo, aun manteniéndose la misma velocidad de desplazamiento de los mismos. Este antecedente es relevante para el desarrollo del presente

---

<sup>1</sup> Armas, Daniela (2011). Trabajo Especial de Grado desarrollado como parte de los requisitos para optar por el título de Ingeniero Industrial. Universidad Católica Andrés Bello. Sede Montalbán: Caracas, Venezuela.

trabajo, ya que confirma la disminución del tráfico vehicular por medio del uso de rotondas en lugares específicos.

- El segundo trabajo fue desarrollado por Valsecchi, A. y Marín, D. (2011) y se tituló “Determinación de las mejores rutas de distribución dentro de una ciudad virtual donde todos los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) han sido sustituidos por rotondas (dispositivos de autorregulación), haciendo uso de un modelo de simulación”<sup>2</sup>. Este trabajo se inició generando un modelo de simulación representativo de una ciudad virtual con rotondas. Seguidamente, se estableció la mejor ruta entre dos puntos, a través de un algoritmo que interactuaba con el simulador, y se determinaron aquellas variables que afectaban los tiempos de distribución, para así diseñar escenarios en función de éstas. Las variables estudiadas fueron: variables de la red vial (tamaño de la red, los sentidos y las calles), variables de la rotonda (la velocidad de diseño, el trazado de los accesos y el radio de las rotondas), variables del sistema de distribución (la velocidad de la entidad de transporte, la cantidad y ubicación de los puntos de distribución) y la variable respuesta representada por el tiempo recorrido. Las principales conclusiones obtenidas del trabajo fueron las siguientes: coincidiendo con el trabajo de Daniela Armas no existe la necesidad de colocar rotondas en intersecciones seguidas; sino, por ejemplo, en aquellas ubicadas entre calles principales y, al asignar una secuencia de ruta al modelo de simulación, según un algoritmo de ruta óptima, se logra disminuir el tiempo de recorrido para la entidad de transporte dentro de la ciudad virtual. Este antecedente es relevante para el desarrollo del presente trabajo debido a que brinda la información necesaria para la ubicación específica de las rotondas dentro de la ciudad virtual. Para evitar situar los dispositivos de autorregulación en intersecciones seguidas, éstos se deben situar, por ejemplo, sólo en aquellas formadas entre calles principales para generar de esta forma una mayor fluidez en las que reflejen un elevado volumen vehicular.

---

<sup>2</sup> Valsecchi, A. y Marín, D. (2011). Trabajo Especial de Grado como parte de los requisitos para optar por el título de Ingeniero Industrial. Universidad Católica Andrés Bello. Sede Montalbán: Caracas, Venezuela.

## CAPITULO 3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se encuentra el tipo de investigación empleado y las fases de la investigación a desarrollar en el presente Trabajo Especial de Grado.

### 3.1 Tipo de Investigación

De acuerdo (Hurtado, 2010) el presente Trabajo Especial de Grado refleja una investigación proyectiva donde se hará uso de un modelo de simulación de eventos discretos, con el fin de determinar las restricciones de tráfico a ser aplicadas en la mejora del flujo vehicular dentro de una ciudad virtual, donde todos los semáforos fueron sustituidos por rotondas.

La investigación proyectiva tiene como objetivo fundamental crear una propuesta específica que solucionará bien sea, un problema o necesidad práctica de un grupo social o institución, en un área en particular del conocimiento. (Hurtado, 2010) afirma que este tipo de investigación “trasciende el campo del cómo son las cosas, para entrar en el cómo podrían o cómo deberían ser, en términos de necesidades, preferencias o decisiones de ciertos grupos humanos”.

### 3.2 Fases de la Investigación

Se definen las siguientes etapas metodológicas para la investigación proyectiva. (Hurtado, 2010)

- Fase Exploratoria: Detecta un evento a modificar.
- Fase Descriptiva: En esta fase se describe la situación a estudiar, se justifica el proyecto, se identifican las necesidades de cambio y se plantea el objetivo general en conjunto con los específicos.
- Fase Comparativa: Contempla las investigaciones con el evento a modificar y los posibles procesos causales.
- Fase Analítica: Presenta las teorías relacionadas con el evento a cambiar y los procesos causales.
- Fase Explicativa: Contiene el sintagma centrado en el evento a modificar, en conjunto con el contexto y sus procesos causales.

- Fase Predictiva: Determina las posibles dificultades y limitaciones, ajuste de objetivo general y específicos.
- Fase Proyectiva: En esta fase se operacionalizan los eventos, se selecciona las unidades de estudio y se elabora los instrumentos diagnósticos.
- Fase Interactiva: Aplica los instrumentos y recoge los datos del contexto, tanto del evento a modificar como de los procesos causales.
- Fase Confirmatoria: Contiene el análisis y el diseño, propuesta o plan de acción total del estudio.
- Fase Evaluativa: Contempla el alcance, recomendaciones y la presentación del documento.

A continuación se presenta la operacionalización de los objetivos. (ver tabla 1)

**Tabla 1. Metodología para el desarrollo del Trabajo Especial de Grado**

Objetivos	Actividades	Producto	Fase
Generar un modelo de simulación representativo de una ciudad virtual con rotondas en lugares específicos según los estudios anteriores	Investigar las fuentes bibliográficas especializadas en el área en estudio	Cap. 4	I
	Obtener la información con respecto a las características y la ubicación de las rotondas en los trabajos especiales de grado realizados con anterioridad		
	Identificar las variables que inciden en el desarrollo del proceso en estudio		
	Identificar la variable respuesta		
	Identificación del sistema de distribución		
Generar una ruta de distribución a modo de prueba	Construcción del modelo de simulación	Cap. 4	I
	Establecer la secuencia de ruta de los vehículos		
	Verificar el correcto funcionamiento del modelo		

Generar escenarios de combinación de restricciones de tráfico	Escenario 1: Aplicar la restricción vehicular Pico & Placa a la ciudad virtual	Cap. 5	II
	Escenario 2: Aplicar la restricción Carpool a la ciudad virtual		
	Escenario 3: Aplicar una combinación de las restricciones vehiculares del escenario 1 y 2 a la ciudad virtual		
Analizar comparativamente los escenarios de ruta al realizar la combinación de restricciones de tráfico	Comparar la variación de los valores de las variables de los escenarios antes mencionados	Cap. 6	III
	Analizar los resultados obtenidos luego de la corrida del modelo		
Seleccionar el mejor escenario y verificar estadísticamente los resultados	Escoger el escenario cuya variable respuesta sea la indicada	Cap. 7	IV

Elaboración: Propia

## CAPITULO 4. ELABORACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

### **4.1 Ubicación de las Rotondas e Identificación de las Variables**

Este subcapítulo representa la primera fase del estudio en el cual se hablará acerca de las características y ubicación de las rotondas, la identificación de las variables que inciden en el desarrollo del Trabajo Especial de Grado y la variable respuesta. Dicha fase se inició a través de una investigación en fuentes bibliográficas referentes al área en estudio en unión con los trabajos realizados anteriormente en la línea de investigación.

#### *4.1.1 Diseño y Ubicación de las Rotondas*

A continuación se enumeran las características básicas de las rotondas que afectan su diseño, circulación y funcionamiento. Luego, se especificará el lugar donde se ubicarán las rotondas dentro de la ciudad virtual

##### *4.1.1.1 Variables de diseño de las rotondas*

Los vehículos deben circular alrededor del islote central de la rotonda donde el flujo vehicular se debe mantener constante para el máximo provecho de ésta. Es importante que los automóviles transiten a bajas velocidades una vez que se incorporan a la rotonda y en el momento que se aproximan a la misma. (ver figura 5)



Figura 5. Características de una rotonda.

Fuente: <http://safety.fhwa.dot.gov/intersection/roundabouts/fhwasa08006/spanish/>

#### 4.1.1.1.1 Velocidad de diseño

La velocidad es un factor clave en el momento en que un conductor opta por una ruta en particular, bien sea para llevar a cabo viajes o para planificar los sistemas de transporte de una empresa. Toda persona analiza dos factores relacionados entre sí al pensar acerca de la conveniencia de una vía, tiempo y velocidad.

Se define como velocidad de diseño aquella considerada como la máxima segura que se puede alcanzar en una vía bajo condiciones favorables de clima y tránsito; su uso se centra en la coordinación de todos los elementos de diseño, básicamente la curvatura. Para impedir la reducción drástica en el flujo vehicular la velocidad de diseño no debe ser muy inferior a la velocidad media de los accesos. No se recomiendan velocidades de diseño mayores a 50 Km/h dentro de la rotonda y la velocidad de entrada a redoma debe ser la velocidad del vehículo con una desaceleración del 30%. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 1997)

#### *4.1.1.1.2 Trazado de los accesos*

El correcto trazado de los accesos es uno de los elementos que afecta directamente el buen funcionamiento de una rotonda. Es importante recordar que para lograr con eficacia y seguridad la salida del tránsito afluente la velocidad media de operación debe ser aproximadamente igual a la de diseño de la rotonda, lo cual se puede lograr por medio de la reducción gradual de la velocidad de los accesos. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 1997)

Las salidas de los accesos se deben diseñar para que proporcionen una mayor o igual velocidad de diseño de la rotonda.

#### *4.1.1.1.3 Trazado del islote central*

El islote central de una rotonda suele ser de forma circular ya que de esta manera es posible que todos los segmentos de la misma se tracen para la misma velocidad de diseño. Según Darder (2005) una media del tamaño del diámetro de una isla central se encuentra comprendida entre los 20 y 40 metros. Tanto la velocidad de diseño como el número de accesos y la distancia entre los entrecruzamientos afectan el islote central.

#### *4.1.1.1.4 Radio de la rotonda*

El radio de una rotonda se crea de acuerdo a la ubicación y a la velocidad de circulación para la cual fue diseñada en principio.

#### *4.1.1.1.5 Número de carriles*

El número de carriles dentro de la rotonda no debe ser mayor al número de carriles de la entrada más amplia. (Del Val, 2002)

#### *4.1.1.2 Ubicación de las rotondas*

Para ubicar las rotondas dentro de la ciudad virtual se tomó como referencia el trabajo desarrollado por (Valsecchi & Marín, 2011).

#### *4.1.1.2.1 Funcionamiento de la rotonda*

Existen normas básicas que definen la correcta circulación de los carros dentro de una rotonda:

- 1) El vehículo que circula dentro de la rotonda tiene prioridad sobre el que dispone a entrar, por lo cual este último debe ceder el paso.
- 2) Los vehículos deben circular a la velocidad que se indique en las señalizaciones y de manera constante.
- 3) Para ingresar a la rotonda cada vehículo se deberá ubicar en el respectivo canal de acceso.
- 4) Para abandonar la rotonda se cumple:
  - a. Si se va a abandonar en la primera salida el vehículo se debe ubicar en el carril externo.
  - b. Si la salida se va a realizar por la segunda rama el vehículo puede circular por cualquier canal de su preferencia.
  - c. Si se va a abandonar por cualquier otra salida el vehículo debe circular por el canal más interno de la rotonda.
- 5) No se permite cambiar el canal de la rotonda excepto en maniobras de entrada y salida.
- 6) No se permite rebasar a otro vehículo dentro de la rotonda.

#### *4.1.2. Variables del Flujo Vehicular*

Las variables del flujo vehicular van a definir las características del modelo, desde su diseño hasta funcionamiento.

##### *4.1.2.1 Tamaño de la red y sentido de las calles*

Con el fin de delimitar la ciudad virtual es necesario precisar dos elementos básicos que constituyen toda red vial: el número de calles y el sentido de las mismas.

#### 4.1.2.2 *Tamaño de las cuadras*

La distancia recorrida por todos los vehículos que transitan dentro de una ciudad se encuentra afectada de manera directa tanto por el largo como por el ancho de las cuadras.

#### 4.1.2.3 *Volumen de tráfico vehicular*

Indica el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal determinada durante un período de tiempo específico. Esta variable del flujo vehicular se encuentra influenciada tanto por el día de la semana como por las horas del día. Su valor es de suma importancia tanto para la planeación como para la operación de la circulación vehicular y se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{N}{T}$$

Donde:

Q = vehículos que pasan por unidad de tiempo

N = número total de vehículos que pasan

T = período determinado

#### 4.1.2.4 *Velocidad local*

En general la velocidad es un término que se refiere a la relación existente entre el espacio recorrido y el tiempo que se tarda en recorrerlo.

Siendo la velocidad local una de las características esenciales del tránsito vehicular, tanto su valor máximo como el recomendado, se encuentra establecido en los reglamentos de tránsito de los países. En adición, se debe tomar en consideración que la velocidad varía dependiendo de la ubicación del vehículo, en otras palabras, si está circulando a través de una calle o avenida principal o secundaria.

### ***4.1.3 Variable Respuesta del Modelo***

Con el fin de evaluar los resultados obtenidos de la simulación se escoge como variable respuesta el tiempo de recorrido de las entidades marcadoras.

#### ***4.1.3.1 Tiempo de recorrido***

Este tiempo se define como aquel que cada entidad marcadora tarda en realizar la ruta. Este tiempo se encuentra influenciado por los controles de velocidad, por ejemplo al acercarse a las rotondas, y la velocidad de circulación, la cual depende de los niveles de tráfico presentes en la ciudad virtual del modelo de simulación.

## **4.2 Características del Sistema de Distribución**

El modelo de simulación contempla la creación de una ciudad virtual donde los automóviles en estudio, representados por entidades marcadoras, deberán obedecer ciertas restricciones vehiculares al transitar por las calles. En adición a dichas restricciones deberán cumplir con las reglas que conllevan el uso de sistemas de autorregulación o rotondas en el modelo. En este subcapítulo se explican las restricciones que serán aplicadas como la ubicación del Centro de Distribución y la secuencia de ruta.

La ruta que deberá seguir cada entidad se encuentra descrita por el recorrido realizado por la entidad marcadora a través de la ciudad virtual.

### ***4.2.1 Restricciones Vehiculares del Modelo***

Se aplicarán dos (2) restricciones vehiculares al modelo con el fin de mejorar el flujo vehicular de la ciudad virtual. Las entidades de tráfico son las únicas entidades que deben cumplir con las restricciones.

#### ***4.2.1.1 Carpool***

Esta restricción se valdrá de la cantidad de pasajeros que trasladan las entidades de tráfico. Cada vehículo deberá transportar más de un (1) pasajero sin excepción, y realizar la secuencia de ruta. Esta restricción se aplicará durante todos los días a toda hora.

#### 4.2.1.2 Pico & Placa

Esta restricción se valdrá de impedir la circulación de los carros durante las horas pico dependiendo del último número de la placa que posee el auto. Esta medida ayuda a gestionar la demanda de transporte y pretende reducir mediante su uso el colapso de las calles y avenidas.

Cada vehículo deberá llevar a cabo la secuencia de ruta dentro de las horas establecidas como horas pico en el modelo de simulación. De no cumplirse esta restricción el vehículo no podrá circular por la ciudad.

La hora pico se aplicará en el siguiente horario:

- 6:00 am hasta 9:00 am
- 12:00 m hasta 2:00 pm
- 5:00 pm hasta 8:00 pm

A continuación se observa el día en el que la circulación se encuentra restringida de acuerdo al último número de la placa del auto.

**Tabla 2. Restricción Pico & Placa de acuerdo a la placa del vehículo**

Día de la semana	Número
Lunes	0-1
Martes	2-3
Miércoles	4-5
Jueves	6-7
Viernes	8-9

Elaboración: Propia

#### 4.2.2 Locación del Centro de Distribución y Puntos de Distribución

Una vez que se sitúe el centro de distribución (C.D.) dentro de la ciudad virtual se ubicarán los diferentes puntos de distribución de forma aleatoria con el fin de crear la secuencia de ruta. Esta última se deberá ejecutar dentro de los horarios establecidos anteriormente y bajo las restricciones vehiculares

correspondientes. Es importante mencionar que el C.D. cumple con la función de crear las entidades marcadoras.

### **4.3 Creación del modelo de simulación**

Este subcapítulo presenta una breve descripción del modelo a desarrollar (Modelo Primario y Modelo Secundario) y los valores de las variables descritas en el capítulo anterior.

Por motivos de comparación se fijarán las rotondas en los lugares definidos por el trabajo de (Valsecchi & Marín, 2011). En el caso de las variables del modelo sus valores provienen de (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 1997).

#### ***4.3.1 Breve Descripción del Modelo***

Por medio de la elaboración del modelo de simulación se va a representar el tráfico que debe ser enfrentado por las ciudades hoy en día. Los vehículos estarán representados por las entidades del modelo. La ciudad es netamente virtual a pesar que los valores utilizados corresponden a los indicados en las leyes venezolanas en materia de tránsito. La ciudad recibe el nombre de SUCA y todas sus calles fueron asignadas con diferentes nombres. El número de calles y avenidas, tanto principales como secundarias, fueron establecidas de manera tal que se asemejen al último trabajo realizado en la presente línea de investigación.

En la ciudad de SUCA existen dos (2) tipos de vehículos que transitan a través de las redes viales, uno de ellos son las entidades de tráfico las cuales son creadas con el fin de asemejar el flujo vehicular de la ciudad al que se encuentra en la vida real. Las otras son las entidades marcadoras que se dividen en: Vehículos Tipo A (livianos) y Vehículos Tipo B (pesados). En la ciudad todas las calles y avenidas son de una (1) sola vía, razón por la cual no está permitido que los vehículos avancen unos a otros. Otra consideración importante que se tomó para asemejar la ciudad de SUCA a la realidad fue restringir el paso de los Vehículos Tipo B por zonas específicas que representan áreas residenciales, lo cual obliga a que dichos vehículos se desvíen para hallar otro camino que los redirija a su destino. Las entidades marcadoras son creadas en un punto fijo que

recibe el nombre de Centro de Distribución, lugar donde salen y retornan luego de realizar una secuencia de ruta. En el caso de las entidades de tráfico, existen varios puntos dispersos a lo largo del inicio de las calles y avenidas donde se crean.

Todos los vehículos tienen un **Número de Placa** que se creó a través de una variable discreta, dicho número fue asignado desde el cero (0) hasta el nueve (9), con la misma probabilidad de ocurrencia. En el programa Simio las variables reciben el nombre de states. Otra variable creada en el modelo recibe el nombre de **Distribuidor**, el cual al tomar el valor 1 significa que el vehículo salió del Centro de Distribución y al valer 0 es una entidad de tráfico, por lo que no proviene del centro antes mencionado. También se estableció el state **Destino**, que se refiere a las salidas de las rotondas por donde los vehículos abandonan las mismas. Todas las variables mencionadas forman parte del Modelo Primario que se explica a continuación de forma más detallada.

El modelo de simulación se inicia con la creación de todos los vehículos, los cuales transitan a través de las redes viales de acuerdo a las velocidades correspondientes al lugar donde se ubiquen. Por ejemplo: la velocidad en las calles secundarias es diferente a la de las avenidas principales al igual que a la entrada de las rotondas. Es importante destacar que se asume que cada vehículo transporta a una (1) sola persona.

En el Modelo Primario no se aplica ninguna restricción vehicular. Al Modelo Secundario se le aplicará la restricción vehicular conocida como Pico & Placa, la cual debe ser acatada únicamente por las entidades de tráfico, impidiendo su libre circulación durante las horas pico. Durante este momento deben permanecer dentro de los estacionamientos creados al inicio de cada calle hasta que la hora pico cese y el vehículo sea liberado a la red vial. Otra restricción que se aplica a las entidades de tráfico de SUCA es el Carpool, con la diferencia que esta se debe cumplir durante todo el día. El Carpool trasladará a dos (2) personas en cada vehículo. La combinación de las restricciones mencionadas anteriormente y su ejecución de manera individual conforma el Modelo Secundario. En ambos

modelos se pretende analizar la variable respuesta que es el tiempo de recorrido de las entidades marcadoras.

### ***4.3.2 Valores de las Variables***

A continuación se encuentran las variables a tomar en consideración para el desarrollo del presente modelo de simulación en conjunto con los valores que las mismas tendrán.

#### ***4.3.2.1 Variables de diseño de las rotondas***

##### ***4.3.2.1.1 Velocidad de diseño***

La velocidad mínima de circulación de los vehículos dentro de la rotonda es de 25 Km/h con una velocidad de circulación deseable de 40 Km/h. La velocidad media de operación en los accesos es de 35 Km/h.

##### ***4.3.2.1.2 Radio de la rotonda***

El radio de la rotonda es de 30 metros para el canal interno y de 35 metros para el canal externo.

#### ***4.3.2.2 Ubicación de las rotondas***

Se colocarán las siguientes rotondas:

- Rotonda Tipo 1 → Habrán ocho (8) rotondas de este tipo en las intersecciones entre las avenidas principales. Tienen tres (3) entradas y tres (3) salidas.
- Rotonda Tipo 2 → Habrán ocho (8) rotondas de este tipo en las intersecciones entre las avenidas principales. Tienen cuatro (4) entradas y cuatro (4) salidas.

Para observar la ubicación de las rotondas antes mencionadas dentro de la ciudad de SUCA ver la figura 6.

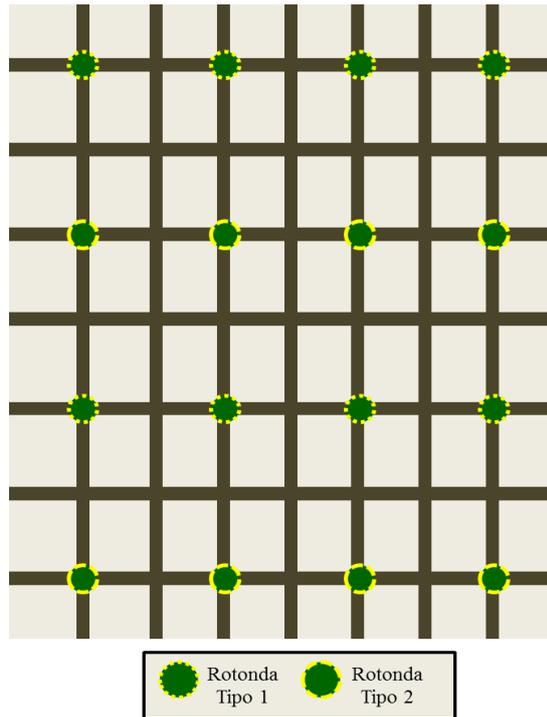


Figura 6. Ubicación de las rotondas en la ciudad de SUCA.

Elaboración: Propia

#### 4.3.2.3 Variables del Flujo Vehicular

##### 4.3.2.3.1 Tamaño de la red y sentido de las calles

La red vial de la ciudad virtual estará compuesta por siete (7) calles horizontales e igual número de calles verticales. Se contarán con dos (2) vías principales doble vía horizontales, cinco (5) calles secundarias horizontales que se alternan entre los sentidos este-oeste, cuatro (4) vías principales doble vía verticales, tres (3) calles secundarias verticales que se alternan entre los sentidos sur-norte. En la figura 7 se puede ver el sentido de las calles.

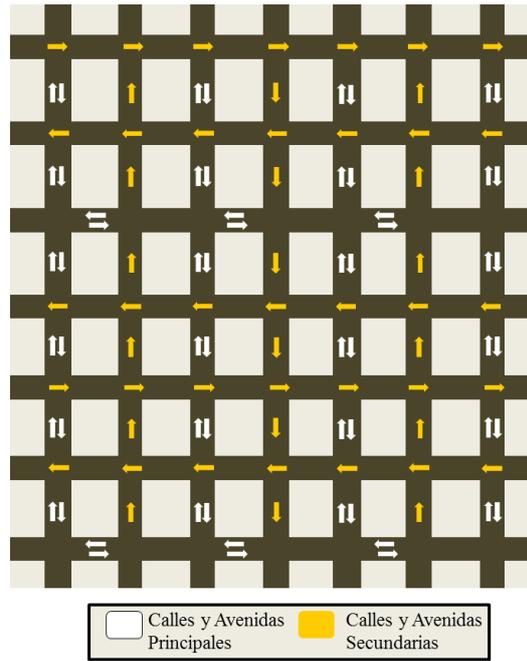


Figura 7. Sentido de las calles de la ciudad de SUCA.

Elaboración: Propia

En la figura 8 se observa el nombre asignado a cada calle y avenida como se mencionó en la descripción del modelo.

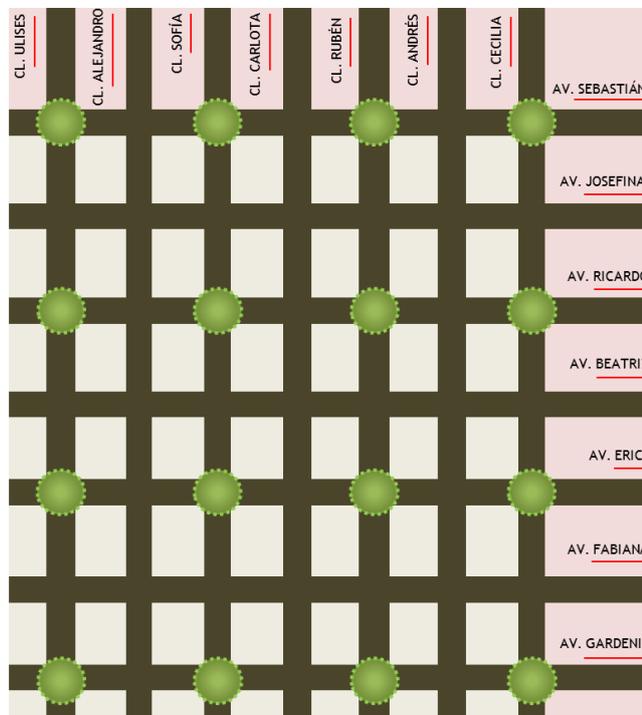


Figura 8. Nombre de las calles y avenidas de la ciudad de SUCA

Elaboración: Propia

#### *4.3.2.3.2 Tamaño de las cuadras*

Las cuadras se diseñarán de 200 metros de largo por 250 metros de alto.

#### *4.3.2.3.3 Volumen del tráfico vehicular*

Existirán dos (2) volúmenes para las entidades de tráfico, uno corresponderá al período de mayor volumen que es la hora pico, de 6:00 am a 9:00 am y de 5:00 pm a 8:00 pm, mientras que el siguiente será asignado para las horas restantes (hora regular). Es importante mencionar que al horario correspondiente al almuerzo, de 12 del mediodía a 2 de la tarde, se le asignará el volumen correspondiente a la hora pico.

El modelo de simulación contará con un volumen vehicular diario de 12.200 entidades de tráfico. Las entidades marcadoras se crearán a lo largo de todos los días a razón de una (1) entidad cada veinticinco (25) minutos, tanto para el caso de los vehículos Tipo A como para los Vehículos Tipo B.

#### *4.3.2.3.4 Velocidad de tránsito vehicular*

De acuerdo a las horas establecidas previamente como horas pico se estableció una distribución para las velocidades de los vehículos que transitarán por las redes viales, estas diferirán según se encuentren circulando Vehículos Tipo A o Vehículos Tipo B.

La velocidad en la ciudad no debe ser mayor de 45 Km/h para los vehículos Tipo A mientras que para los Vehículos Tipo B es el 60% de dicha velocidad. Las calles secundarias tienen una disminución en la velocidad del 40%. En el caso de las entidades de tráfico la velocidad utilizada representa una disminución del 10% en la utilizada para los vehículos Tipo A.

Tabla 3. Velocidad del Tránsito Vehicular

Tipo de Vehículo	Distribución de la Velocidad (Km/h)	
	Calles Principales	Calles Secundarias
Vehículo Tipo A	TRIA (35, 45, 55)	TRIA (21, 27, 33)
Vehículo Tipo B	TRIA (14, 18, 22)	TRIA (8, 11, 13)
Entidades de Tráfico	TRIA (31, 41, 50)	TRIA (19, 24, 30)

Fuente: Normas para el Proyecto de Carreteras del Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Venezuela 1997

Elaboración: Propia

#### 4.3.2.4 Variables del sistema de distribución

##### 4.3.2.4.1 Número de puntos de distribución

Se establecieron cinco (5) puntos de distribución.

##### 4.3.2.4.2 Locación del centro de distribución y puntos de distribución

Los cinco (5) puntos de distribución se ubicaron de manera aleatoria en la red vial de la ciudad de SUCA. La secuencia de ruta se debe iniciar una vez que las entidades marcadoras salen del Centro de Distribución (C.D.) y se desplazan siguiendo el orden creciente de los números para retornar a donde se crearon. En la figura 9 se observa la locación exacta de los puntos y del C.D.

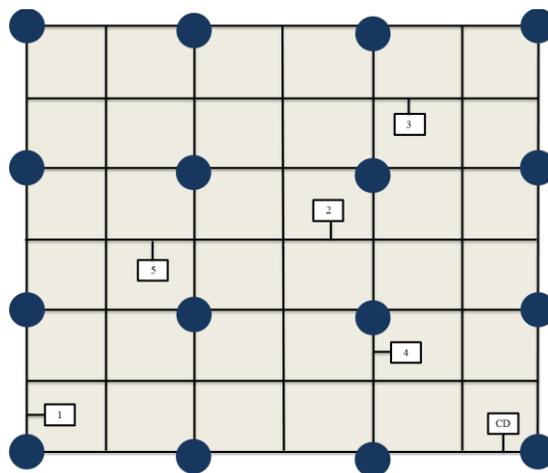


Figura 9. Ubicación del C.D. y de los puntos de distribución.

Elaboración: Propia

### 4.3.3 Construcción del Modelo Primario

En esta parte se utilizará el software de simulación conocido como Simio para construir el modelo de simulación, tanto primario como secundario.

#### 4.3.3.1 Creación de la red vial

Las calles se crearon a través del conector de Simio llamado “Path”, el cual da lugar a lo que se conoce como “Pathway” que representa las vías o calles de la ciudad y permite ingresar tanto la distancia a recorrer por el vehículo como la máxima velocidad que el mismo debe tener. En los extremos del Pathway se colocan unos nodos que reciben el nombre de “TransferNode”, estos cumplen con la función de conectar las calles entre sí (ver figura 10). En algunos casos los nodos funcionan como intersecciones y permiten llamar a procesos externos en el momento que entra o sale una entidad del nodo. El uso de los procesos externos permite incorporar lógicas relacionadas con el funcionamiento de la red vial al modelo.

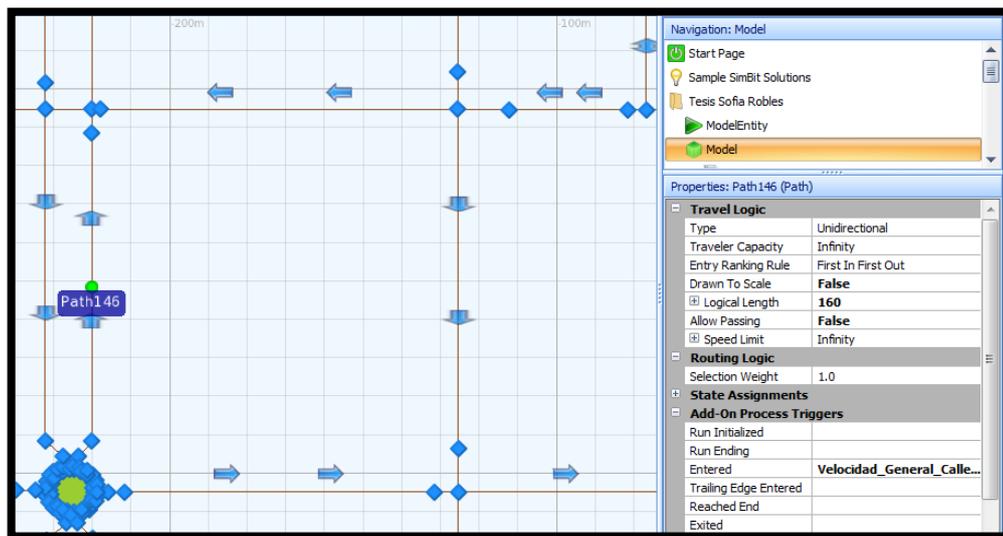


Figura 10. Representación de una calle principal por medio de un Path.

Elaboración: Propia

#### 4.3.3.2 Creación de las rotondas

Las rotondas se construyeron tomando en consideración la prioridad de entrada y salida que deben cumplir los vehículos, también se consideró la velocidad que estos deben tener tanto al entrar como al circular a través de la

redoma. El uso de TransferNodes, Connectors y Paths fueron básicos para su correcta elaboración.

En la figura 11 se encuentra la rotonda Tipo 1 que está compuesta por igual número de salida y entradas, tres (3).

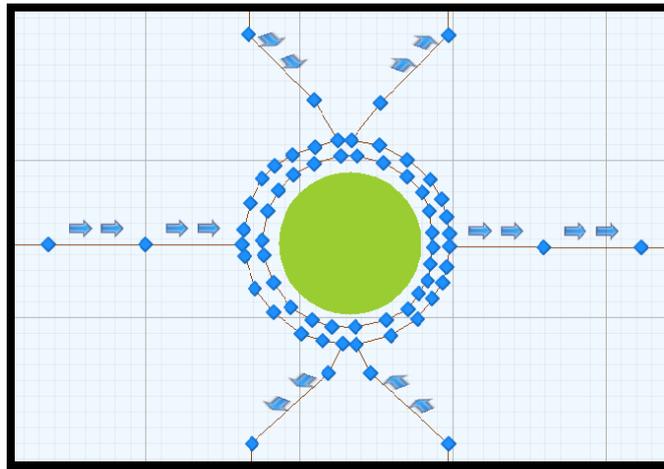


Figura 11. Rotonda Tipo 1.

Elaboración: Propia

En la figura 12 se encuentra la rotonda Tipo 2 que está compuesta por igual número de salida y entradas, cuatro (4).

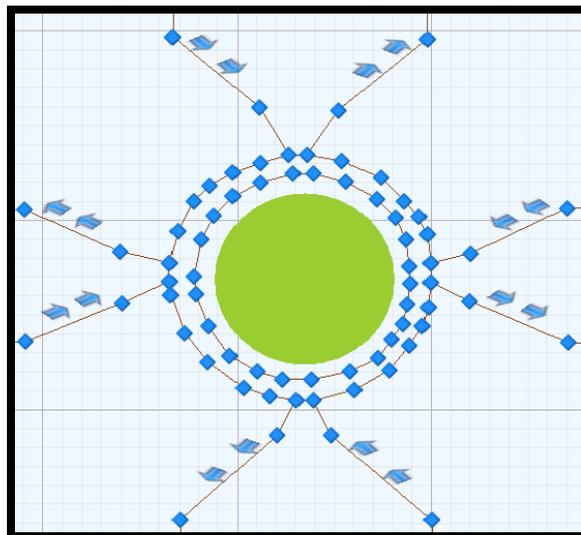


Figura 12. Rotonda Tipo 2.

Elaboración: Propia

#### 4.3.3.3 Creación de las intersecciones

Las intersecciones se crearon tomando como base una serie de prioridades en las que se destacan que las calles principales tienen prioridad sobre las calles secundarias y las calles secundarias verticales tienen prioridad sobre las calles secundarias horizontales. En adición, todas las entidades sin prioridad de cruce deben revisar que no hallan entidades cruzando en los 15 metros anteriores al cruce por la calle que tiene la prioridad.

Se hizo uso de los TransferNode para crear las intersecciones como se observa en la figura 13, donde dos de ellas se marcaron con un círculo rojo.

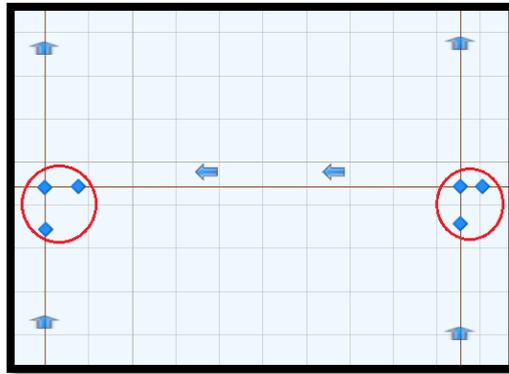


Figura 13. Intersecciones.

Elaboración: Propia

#### 4.3.3.4 Creación del centro y puntos de distribución

Para crear el C.D. y los puntos de distribución se utilizaron TransferNodes, lugares donde sólo pueden entrar las entidades marcadoras. Se estableció 0,1 segundos como el tiempo de entrada y salida de cada nodo. En la figura 14 se observa la secuencia de ruta que deberán seguir las entidades marcadoras una vez que salen del C.D. de la ciudad SUCA.

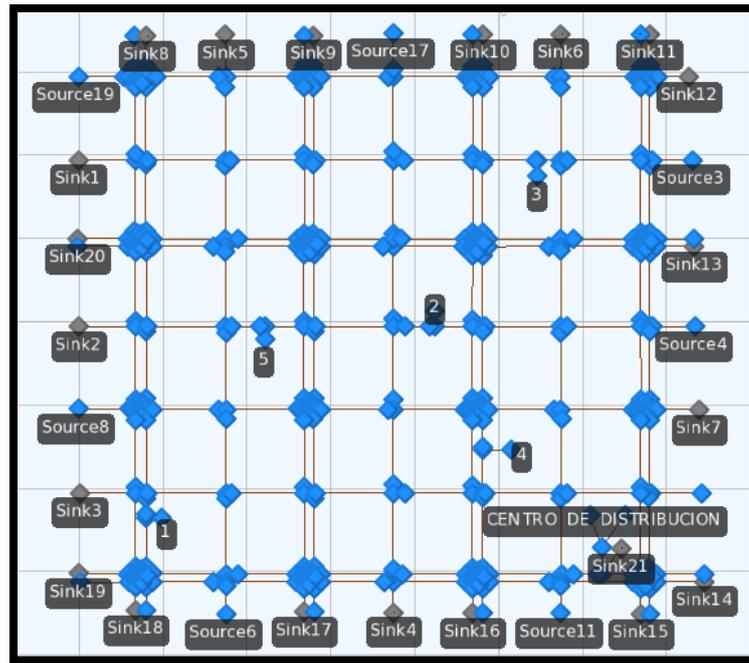


Figura 14. Ciudad de SUCA con su C.D. y puntos de distribución.

Elaboración: Propia

#### 4.3.3.5 Consideración adicional del modelo primario

Con el fin de asemejar el modelo de simulación de la ciudad virtual lo más posible a la realidad se tomó en consideración las áreas residenciales dentro de la ciudad de SUCA.

##### 4.3.3.5.1 Área residencial

En las áreas residenciales del modelo se encuentra prohibido el tránsito libre de los vehículos pesados durante todos los días y a toda hora. Esta restricción se aplicó luego de un breve análisis de las calles y avenidas de SUCA con el fin de ubicar dos (2) de ellas donde la circulación de los Vehículos Tipo B fuese recurrente. Como consecuencia se establecieron las áreas en las siguientes locaciones:

- Av. Eric con Cl. Alejandro y Cl. Sofía
- Cl. Andrés con Av. Ricardo y Av. Beatriz

En la figura 15 se observa la ubicación exacta de las áreas residenciales en SUCA.

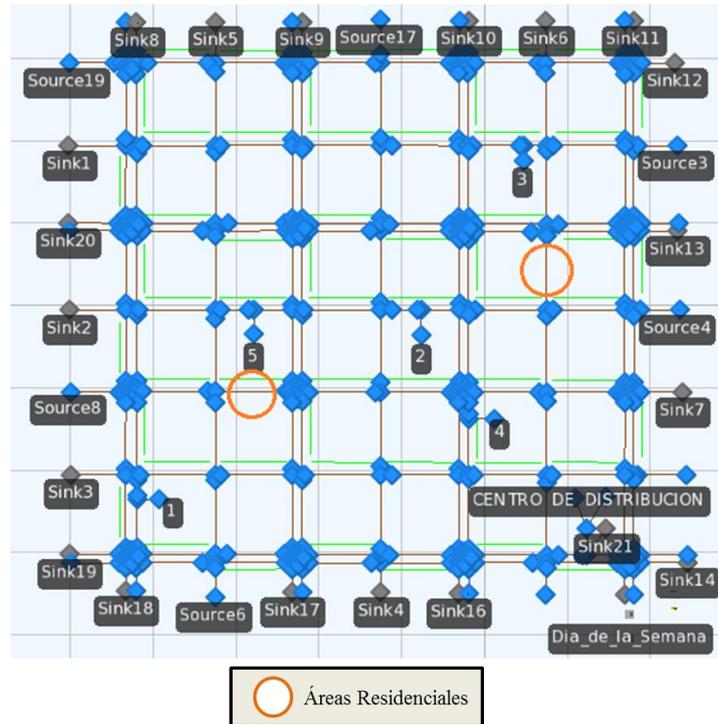


Figura 15. Ubicación de las áreas residenciales.

Elaboración: Propia

En el momento que se elaboró la lógica correspondiente a los Vehículos Tipo B para evitar su paso por estas dos calles se debió redirigirlos al nodo más cercano fuera del área restringida, lo cual trajo como consecuencia que la entidad no recordase su secuencia de ruta original. Como solución a dicho problema se creó un proceso designado como Recordatorio General que se encarga de enviar a cada entidad a su nodo destino, el cual corresponde al nodo que se dirigía en su ruta original.

#### 4.3.4 Construcción del Modelo Secundario

El Modelo Secundario representa la combinación de restricciones vehiculares que se llevaron a cabo en la ciudad de SUCA.

##### 4.3.4.1 Variables creadas

Se crearon dos (2) variables en el modelo para aplicar las restricciones a las entidades de tráfico.

#### *4.3.4.1.1 Día de la Semana*

Se estableció una variable con el nombre **Día de la Semana** que se encarga de asignar un número a los días. El valor inicial de dicha variable es cero (0) y por medio del uso de un Timer este número cambia cada 24 horas de forma creciente hasta llegar al siete (7). El número uno (1) corresponde al lunes, dos (2) al martes y así sucesivamente hasta llegar al siete (7) para el domingo. En el momento que se acaba la semana se empieza el ciclo otra vez iniciando desde el uno (1).

Las restricciones vehiculares se deben cumplir de lunes a viernes únicamente, razón por la cual durante los fines de semana todas las entidades transitan libremente a través de las calles y avenidas de la ciudad de SUCA.

#### *4.3.4.1.2 Hora Pico*

Se estableció una variable con el nombre de **Hora Pico** que se activa a las 6:00 am y permanece encendida hasta las 9:00 am, luego se vuelve a activar para la hora del almuerzo de 12 del mediodía a 2:00 pm y finaliza encendiéndose en la tarde de 5:00 pm a 8:00 pm.

Se tiene un indicador en el modelo que se activa al marcar uno (1), lo cual significa que en la ciudad la restricción vehicular está en acción, por lo que el Pico & Placa se debe cumplir. Caso contrario sucede cuando dicho indicador marca cero (0), ya que las entidades de tráfico pueden transitar libremente.

#### *4.3.4.2 Consideración adicional del modelo secundario*

Durante la hora pico las entidades de tráfico al no poder circular por las calles y avenidas de SUCA deben permanecer en un lugar específico hasta que la restricción cese. Por esta razón se creó un sitio cuya función es mantener los vehículos dentro de una cola con capacidad infinita por el tiempo que corresponda. Estos lugares reciben el nombre de estacionamientos dentro del modelo y se encuentran ubicados en las calles y avenidas de la ciudad virtual.

Esta consideración adicional se inicia en los nodos de entrada de las calles y avenidas, donde el modelo activa un proceso que consiste en identificar primero si el día de la semana es menor o igual a cinco (lunes a viernes), para

posteriormente preguntar si el vehículo que transita es una entidad marcadora y cuál es su número de placa. Con esta última información, según sea el caso, podrá transitar libremente por SUCA o se transferirá el vehículo al estacionamiento que le corresponda y una vez que la hora pico finalice, dicho automóvil se regresará al nodo donde fue tomado.

Los estacionamientos se crearon a través de un elemento de SIMIO que se conoce como Station el cual permite definir la locación donde una o más entidades del modelo residirán por un momento determinado. Para poder transferir las entidades de tráfico dentro y fuera de estos estacionamientos se utilizó el módulo Transfer. Con el fin de asegurar el fin de la transferencia de las entidades se utilizó el módulo EndTransfer, este indica que el objeto o entidad ha completado la transferencia a la estación.

#### ***4.3.5 Verificación del Modelo***

Para el presente Trabajo Especial de Grado no se tienen datos históricos, razón por la cual se procedió a verificar el correcto funcionamiento del modelo y sus diferentes escenarios. A continuación se encuentra una breve lista de algunos de los procesos verificados:

- ✓ Las entidades marcadoras cumplen con la secuencia de ruta asignada.
- ✓ Los Vehículos Tipo B no circulan por las dos (2) calles asignadas como áreas urbanas, sino buscan una nueva ruta que les permita llegar a su nodo destino.
- ✓ Las entidades de tráfico circulan libremente por la ciudad de SUCA fuera del horario pico, mientras que al aplicarse la restricción Pico & Placa dichas entidades entran y salen de los estacionamientos de manera correcta según su número de placa y en las horas correspondientes.
- ✓ Las restricciones vehiculares se cumplen de lunes a viernes, razón por la cual durante el fin de semana todas las entidades del modelo pueden circular libremente por la red vial de la ciudad.
- ✓ Los vehículos no se adelantan entre sí y cumplen con las velocidades asignadas a los diferentes lugares de la ciudad (calles principales, calles secundarias, aproximación a intersecciones, rotondas).

## CAPÍTULO 5. DISEÑO Y RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS DEL MODELO

Este capítulo es la tercera fase del estudio y describe los tres (3) escenarios llevados a cabo en la ciudad de SUCA, donde durante la hora pico se aplicaron las restricciones vehiculares a las entidades de tráfico con el fin de conocer el tiempo de recorrido de las entidades marcadoras (Vehículos Tipo A y Vehículos Tipo B) en realizar la secuencia de ruta. Este tiempo es el resultado del modelo, la variable respuesta. En adición, en este capítulo se encuentra la verificación estadística de los resultados obtenidos en cada escenario.

### 5.1 Descripción General

A continuación se explican de manera corta y concisa los diferentes escenarios que componen el Modelo Secundario. De igual forma se presentan tanto los resultados obtenidos de dichos escenarios como el resultado obtenido del Modelo Primario.

Es importante destacar que el tiempo de control indica el tiempo de recorrido de las entidades en el Modelo Primario, el cual carece de restricciones vehiculares, razón por la cual se utilizó para comparar los demás resultados.

#### 5.1.1 Escenario Uno

En este escenario se aplicó la restricción vehicular Pico & Placa a la ciudad de SUCA. En la tabla 4 se observa el tiempo de recorrido de las entidades marcadoras y el tiempo control.

**Tabla 4. Tiempo de Recorrido en el Escenario 1**

Entidad Marcadora	Tiempo de Recorrido (minutos)	Tiempo Control (minutos)
Vehículo Tipo A	19	23
Vehículo Tipo B	45	52

Elaboración: Propia

### 5.1.2 Escenario Dos

En este escenario se aplicó la restricción vehicular Carpool a la ciudad de SUCA, donde se disminuyó en un 37% el total del volumen vehicular de las entidades marcadoras. Este porcentaje es resultado de una breve investigación donde se obtuvo información de un operativo realizado en Canadá en el año 2009.

Para este escenario las entidades marcadoras se crearon a lo largo de todos los días a razón de una (1) entidad cada treinta y cuatro (34) minutos, tanto para el caso de los vehículos Tipo A como para los Vehículos Tipo B.

En la tabla 5 se encuentra el tiempo de recorrido de los Vehículos Tipo A y los Vehículos Tipo B en conjunto con el tiempo control, resultado del Modelo Primario.

**Tabla 5. Tiempo de Recorrido en el Escenario 2**

Entidad Marcadora	Tiempo de Recorrido (minutos)	Tiempo Control (minutos)
Vehículo Tipo A	20	23
Vehículo Tipo B	48	52

Elaboración: Propia

### 5.1.3 Escenario Tres

En este escenario se aplicó una combinación de las restricciones vehiculares. En el transcurso de los días de la semana todas las entidades de tráfico debieron acatar tanto el Carpool como el Pico & Placa.

Para este escenario las entidades marcadoras se crearon a lo largo de todos los días a razón de una (1) entidad cada treinta y cuatro (34) minutos, tanto para el caso de los vehículos Tipo A como para los Vehículos Tipo B. (ver tabla 6)

**Tabla 6. Tiempo de Recorrido en el Escenario 3**

Entidad Marcadora	Tiempo de Recorrido (minutos)	Tiempo Control (minutos)
Vehículo Tipo A	17	23
Vehículo Tipo B	44	52

Elaboración: Propia

En la tabla 7 se encuentra el estudio realizado al escenario control y los diferentes escenarios que constituyen el Modelo Secundario del presente Trabajo Especial de Grado. Para descartar el efecto de la aleatoriedad del sistema y asegurar la validez de los resultados obtenidos en los modelos, se realizó una comparación de medias entre los diferentes escenarios y variables, permitiendo descartar aquellos escenarios en los cuales no fuese posible rechazar la hipótesis de igualdad entre las medias.

**Tabla 7. Resultados de la verificación estadística de los diferentes escenarios**

	Escenario Uno Vehículo Tipo A	Escenario Uno Vehículo Tipo B	Escenario Dos Vehículo Tipo A	Escenario Dos Vehículo Tipo B	Escenario Tres Vehículo Tipo A	Escenario Tres Vehículo Tipo B
Escenario Control Vehículo Tipo A	✓	-	✓	-	✓	-
Escenario Control Vehículo Tipo B	-	✓	-	✓	-	✓
Escenario Uno Vehículo Tipo A	-	-	X	-	✓	-
Escenario Uno Vehículo Tipo B	-	-	-	✓	-	X
Escenario Dos Vehículo Tipo A	-	-	-	-	✓	-
Escenario Dos Vehículo Tipo B	-	-	-	-	-	✓
Escenario Tres Vehículo Tipo A	-	-	-	-	-	-
Escenario Tres Vehículo Tipo B	-	-	-	-	-	-

Elaboración: Propia

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se procedió a analizar los resultados obtenidos en los tres (3) escenarios del modelo de simulación de la ciudad virtual de SUCA y la verificación estadística de los mismos.

### 6.1 Análisis de Resultados

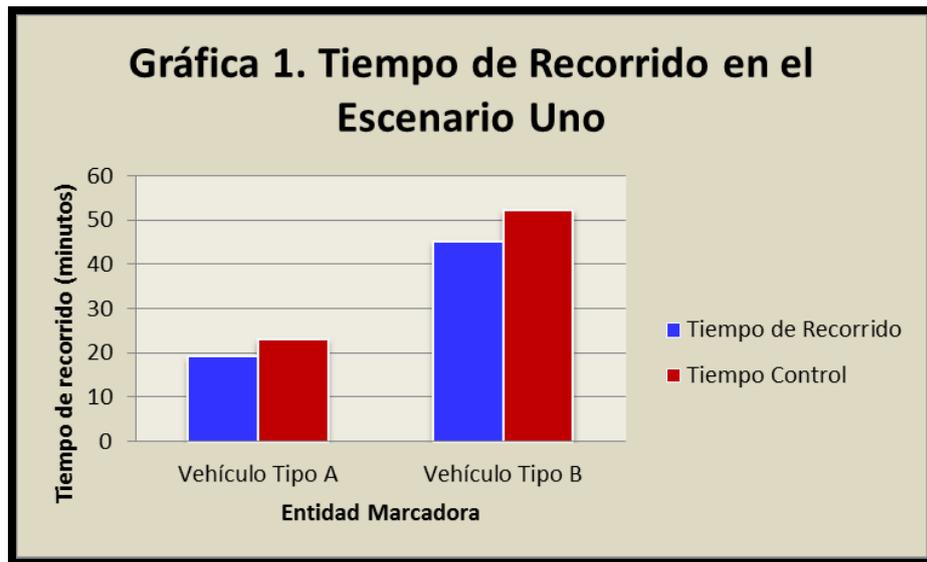
Los resultados de la verificación estadística indican que no se pueden comparar los siguientes escenarios:

- *Escenario Uno* Vehículo Tipo A con el *Escenario Dos* Vehículo Tipo A
- *Escenario Uno* Vehículo Tipo B con el *Escenario Tres* Vehículo Tipo B

Estos escenarios no tienen ningún impacto en el estudio porque sus medias son iguales.

Para el *Escenario Uno*, donde la restricción vehicular aplicada es el Pico & Placa se observa una disminución en el tiempo de recorrido, tanto para los Vehículos Tipo A como para los Vehículos Tipo B en contraste con el tiempo de control (este resultado se obtuvo en el Modelo Primario donde no se aplicaba ninguna restricción vehicular). En el caso del Vehículo Tipo A el tiempo de recorrido disminuyó de 23 minutos a 19 minutos, lo cual representa una reducción del 17%. Para el Vehículo Tipo B la disminución es del 14% ya que el tiempo se redujo de 52 minutos a 45 minutos.

En el gráfico 1 se observan los resultados mencionados anteriormente como también una marcada diferencia entre los tiempos de recorrido de los dos tipos de vehículo. Esta disimilitud se debe a dos razones: los vehículos Tipo B deben transitar a través de la ciudad a una velocidad menor que la del Vehículo Tipo A y los autos no pueden adelantarse unos a otros ya que las vías son de un solo sentido. Por ejemplo, si un vehículo liviano se encuentra detrás de uno pesado deberá permanecer en ese lugar, sin poder adelantarlo, a menos que suceda el caso que llegue a una intersección y ambos tengan un destino diferente.

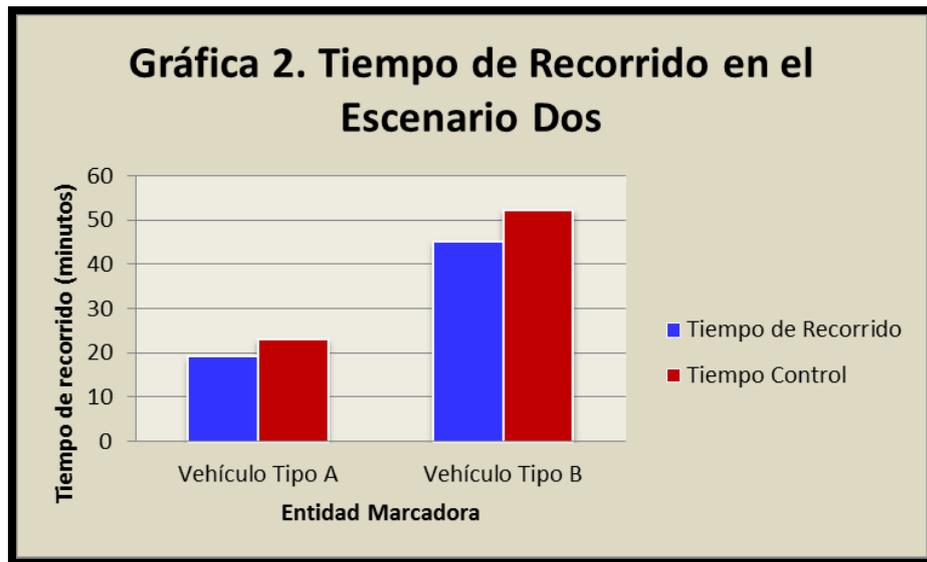


Gráfica 1. Tiempo de recorrido en el Escenario Uno

Elaboración: Propia

Para el *Escenario Dos*, donde sólo se aplicó la restricción vehicular Carpool, el tiempo de recorrido de las entidades marcadoras en el Modelo Secundario es menor que el tiempo utilizado para realizar la misma secuencia de ruta por estas entidades en el Modelo Primario. Los vehículos livianos realizan la secuencia de ruta en 20 minutos al trasladar dos personas por vehículo, lo cual significa una disminución del 13% en comparación con el tiempo control. En el caso de los vehículos pesados, el tiempo control difiere en 4 minutos del tiempo de recorrido de la entidad, lo cual constituye una disminución del 8%.

Se observa en el gráfico 2 los resultados de la variable respuesta. De igual manera, la marcada diferencia existente entre los tiempos de recorrido de las entidades marcadoras se debe a la misma razón explicada en el gráfico 1.

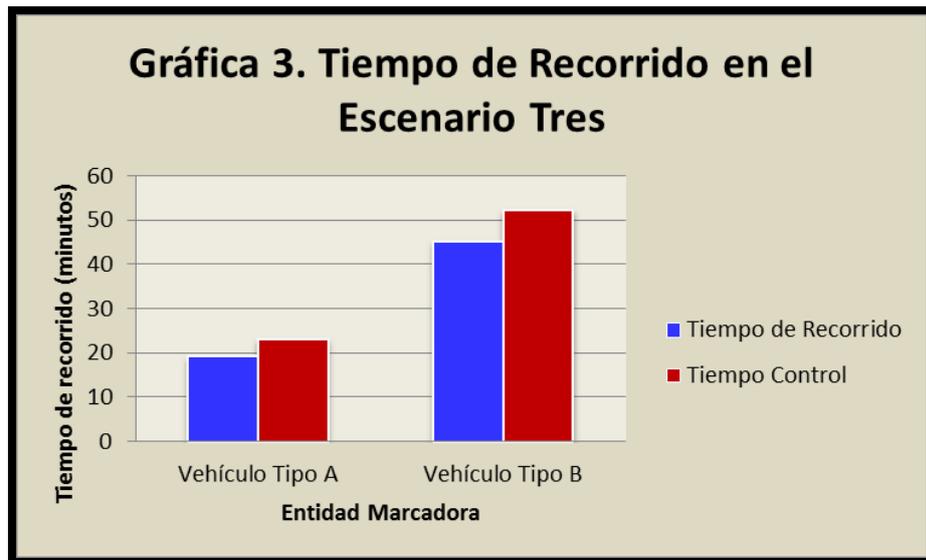


Gráfica 2. Tiempo de Recorrido en el Escenario Dos

Elaboración: Propia

Para el *Escenario Tres* se aplicó una combinación de las restricciones vehiculares que componen los dos escenarios anteriores, Pico & Placa más Carpool para todas las entidades de tráfico que circulan en la ciudad de SUCA. En este escenario se encuentra la mayor diferencia entre el tiempo de recorrido de los vehículos pesados y livianos en comparación con el tiempo control. El Vehículo Tipo A realiza la secuencia de ruta en 17 minutos cuando se cumplen las restricciones vehiculares lo cual representa una disminución del 26% con respecto al tiempo control. En el caso del Vehículo Tipo B, el tiempo de recorrido y el tiempo control difieren en 8 minutos, resultando de esta manera una disminución en el tiempo del 15%.

Al igual que en los dos escenarios anteriores, la diferencia existente entre los tiempos de recorridos de los vehículos se debe a las razones dadas en el gráfico 1. A continuación se observa el gráfico 3 donde están los resultados obtenidos.



Gráfica 3. Tiempo de Recorrido en el Escenario Tres

Elaboración: Propia

Al comparar los tres escenarios anteriores se destaca una constante entre ellos: la aplicación de restricciones de tráfico a la ciudad virtual de SUCA genera una mejora en el flujo vehicular que transita en sus calles y avenidas en comparación con la ciudad sin ninguna restricción vehicular.

Para los vehículos Tipo A se contrastó el *Escenario Uno* y el *Escenario Dos* con el *Escenario Tres*, siendo este último el seleccionado como el más favorable. Al aplicar sólo la restricción Carpool el valor de la variable respuesta disminuye, tal como refleja el resultado obtenido en el segundo escenario. Caso similar sucede al aplicar sólo la restricción Pico & Placa, ya que el tiempo empleado por el vehículo Tipo A en realizar la secuencia de ruta se reduce.

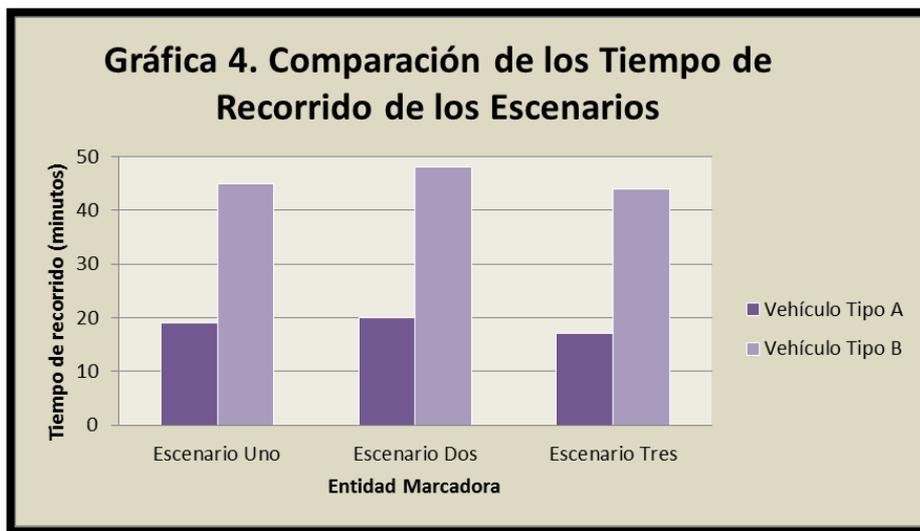
El *Escenario Tres* es el mejor escenario para los vehículos livianos ya que demuestra que al aplicar una combinación de las restricciones vehiculares, Pico & Placa más el Carpool, la secuencia de ruta se lleva a cabo en un 26% menos para los vehículos Tipo A. Este resultado se debe a dos razones: disminuir en un 37% el volumen vehicular de las entidades marcadoras, pasando de crearlas cada 25 minutos a 34 minutos a lo largo del día y la prohibición del libre tránsito de las entidades de tráfico durante las horas pico. Es importante destacar que las horas

empleadas para aplicar el Pico & Placa constituyen un 33% de las horas totales de un (1) día, en otras palabras, 8 de 24 horas.

Para los vehículos Tipo B se contrastó el *Escenario Uno* y el *Escenario Tres* con el *Escenario Dos*, siendo el *Escenario Tres* el seleccionado como el mejor. En el caso que se aplicó solo la restricción Pico & Placa los resultados reflejan una disminución en el tiempo de recorrido de las entidades marcadoras, siendo similar el resultado obtenido al sólo aplicar el Carpool, ya que la variable respuesta presenta una reducción.

El *Escenario Tres* es el mejor escenario para los vehículos pesados ya que demuestra que al aplicar una combinación de las restricciones vehiculares, Pico & Placa más el Carpool, la secuencia de ruta se lleva a cabo en un 15% menos para los vehículos Tipo B. Las razones para estos resultados son las mismas expuestas anteriormente para los vehículos livianos.

En la gráfica 4 se observa la comparación de los tiempos de recorrido de las entidades marcadoras en los tres (3) escenarios planteados, observando que la mayor disminución se refleja en el *Escenario Tres*.



Gráfica 4. Comparación de los Tiempos de Recorrido de los Escenarios

Elaboración: Propia

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del estudio realizado en el presente Trabajo Especial de Grado se puntualizan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

### 7.1. Conclusiones

- Se generó un modelo de simulación con dieciséis (16) rotondas, ocho (8) con tres (3) entradas e igual número de salidas y ocho (8) con cuatro (4) entradas e igual número de salidas, catorce (14) calles y avenidas, siete (7) horizontales e igual número verticales, lo cual constituye el Modelo Primario.
- Se diseñó una secuencia de ruta de manera aleatoria en la ciudad virtual de SUCA con el fin que fuese ejecutada por las entidades marcadoras, los Vehículos Tipo A y los Vehículos Tipo B. Estas entidades constituyen las entidades en estudio del presente Trabajo Especial de Grado, específicamente el tiempo de recorrido de las mismas en realizar la secuencia mencionada anteriormente.
- Se generaron tres (3) escenarios que contienen las restricciones vehiculares en estudio: Pico & Placa y Carpool, los cuales constituyen el Modelo Secundario.
- Se analizaron los resultados obtenidos del Modelo Secundario y se compararon con los resultados control, provenientes del Modelo Primario, el cual carece de la aplicación de restricciones vehiculares en la ciudad de SUCA.
- Se seleccionó el *Escenario Tres* para los Vehículos Tipo A y para Vehículos Tipo B como el mejor debido a la marcada disminución en la variable respuesta, siendo la reducción del 26% y 15% respectivamente. Se compararon sólo aquellos escenarios cuyos resultados son diferentes

estadísticamente, razón por la cual los cambios realizados en dichos escenarios no son consecuencia de la aleatoriedad del sistema.

## **7.2. Recomendaciones**

- Se recomienda crear otros Centros de Distribución dentro de la ciudad virtual con el fin de crear entidades marcadoras en diferentes puntos de la red vial y así tener varias locaciones para comparar el tiempo de recorrido.
- Se recomienda establecer como otra variable respuesta del modelo el Nivel de Servicio de las calles y avenidas. Este valor es una medida cualitativa que se describe en términos de la velocidad, tiempos de viaje, interrupciones en el flujo, entre otros. Se adoptan seis niveles de servicio de acuerdo a las seis primeras letras del abecedario (Nivel A, B, C, D, E, F) y existen criterios de este nivel tanto para carreteras como para autopistas. A cada nivel de servicio corresponde un rango de flujo ideal que se denomina volumen de servicio.
- Se recomienda realizar en las avenidas y calles secundarias vías de dos (2) canales para así asemejar la ciudad virtual más a la realidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### *LIBROS*

Cal y Mayor, R., & Cárdenas, J. (2000). *Ingeniería de Trñansito: Fundamentos y Aplicaciones* (Vol. 7ma Edición). México: Alfaomega.

Cárdenas, L., García, E., & García, H. (2006). *Simulación y Analisis de Sistemas con ProModel* (Vol. 1era Edición). México: Person Educación.

Department of Transportation, U. S. (2008). *Federal Highway Administration*. Recuperado el 29 de Marzo de 2012, de <http://www.fhwa.dot.gov/>

Hurtado, J. (2010). *Metodología de la Investigación*. Caracas: Quirón Ediciones.

Ison, S., Meyer, M., & Rye, T. (2008). *The Implementation and Effectiveness of Transport Demand Management Measures* . Cornwall: Ashgate.

Kelton, D., Sadowski, R., & Sturrock, D. (2008). *Simulación con Software Arena*. México : Mc Graw Hill.

Moller, R. (2006). *Transporte Urbano y Desarrollo Sostenible en América Latina* . Cali: Universidad del Valle.

Shannon, R. (2003). *System Simulation: the Art And Science* . Prentice Hall.

Summers, G., & Summers G, G. (2011). *50 Inventos y la Mente que los Ingenió*. Madrid: Planeta Madrid .

### ***PUBLICACIONES DIGITALES***

Garzón, A., & Torrealba, I. (11 de Junio de 2010). *El Tráfico en Caracas*. Recuperado el 21 de Mayo de 2012, de <http://2dtraficoencaracas.blogspot.com/2010/06/entrevistas-hechas-5-personas-que.html>

González, L. (Agosto de 2003). *Seguridad Vial* . Recuperado el 23 de Junio de 2012, de <http://www.supermotor.com/revista/seguridadvial/274340/galeria/?1376251a81329152i3.jpg>

SIMIO. (2012). *SIMO Forward Thinking*. Recuperado el 11 de Mayo de 2012, de <http://www.simio.com/index.html>

### ***REVISTAS DIGITALES***

Rodriguez, S. (24 de Marzo de 2008). Chacao comenzó la campaña por el Pico y Placa. *Noticias 24*, pág. 11.

### ***MANUALES***

Ayuntamiento de Madrid, G. M. (Diciembre de 2000). *Instrucción de Vía Pública*. Recuperado el 12 de Abril de 2012, de [http://www.carreteros.org/normativa/travesias/pdfs/ccaa\\_pdf/ivp\\_ay\\_madrid.pdf](http://www.carreteros.org/normativa/travesias/pdfs/ccaa_pdf/ivp_ay_madrid.pdf)

Del Val, M. Á. (2002). *XVI Curso Internacional de Carreteras. Tráfico*. Madrid: Fundación Agustín de Betancourt.

Dirección de Ministerio de Transporte, M. (Octubre de 2000). Recuperado el 16 de Abril de 2012, de Funciones de las Rotondas Urbanas y Requerimientos Urbanísticos de Organización: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3375/5/36814-5.pdf>

Ministerio de Transporte y Comunicaciones, V. (1997). *Normas para el Proyecto de Carreteras del Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Venezuela*. Caracas.

Ministerio de Transporte y Comunicaciones, P. (2000). *Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras* (Vol. 2da Edición). Lima.

### **TESIS**

Armas, D. (2011). *Determinación de los cambios que se producen en una ruta de distribución cuando se sustituyen los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) por rotondas (dispositivos de autorregulación) en una ciudad virtual, haciendo uso de un modelo de simulación*. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello .

Darder, V. (2005). *Funciones de las rotondas urbanas y requerimientos*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.

Valsecchi, A., & Marín, D. (2011). *Determinación de las mejores rutas de distribución dentro de una ciudad virtual donde todos los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) han sido sustituidos por rotondas (dispositivos de autorregulación), haciendo uso de un modelo de simulación*. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello .

## ANEXOS

### Anexo 1. Procesos del Modelo Primario

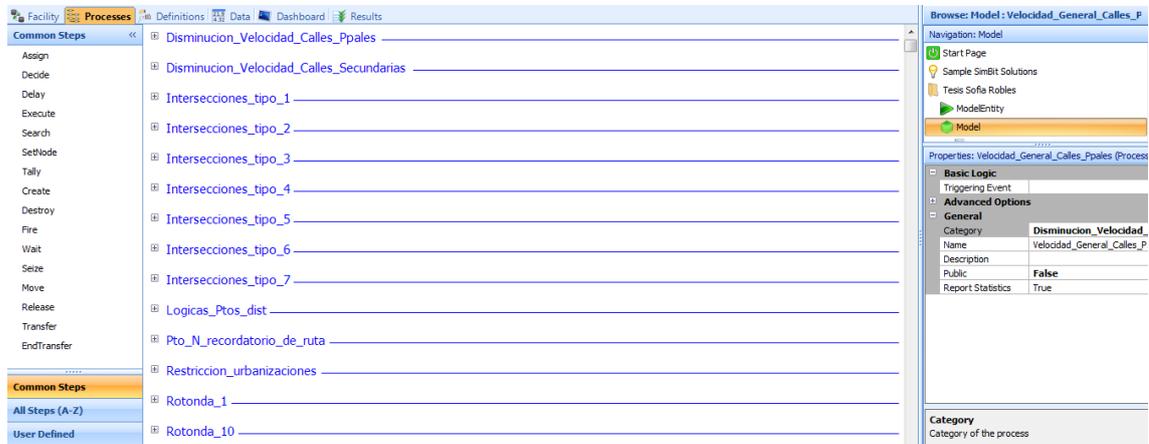


Figura 16. Lista de los procesos del Modelo Primario (parte 1 de 2)

Elaboración: Propia

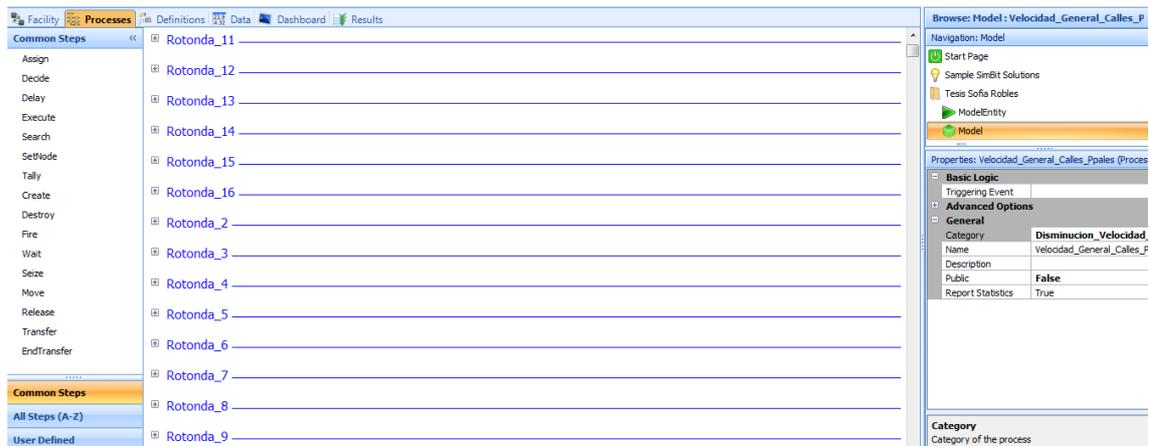


Figura 17. Lista de los procesos del Modelo Primario (parte 2 de 2)

Elaboración: Propia

Anexo 2. Disminución de Velocidades en Calles Principales y Secundarias

Disminucion\_Velocidad\_Calles\_Ppales

Velocidad\_General\_Calles\_Ppales

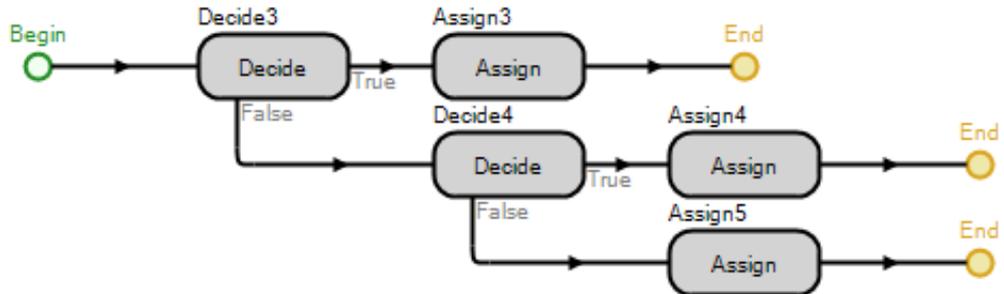


Figura 18. Lógica para la velocidad en calles principales

Elaboración: Propia

Disminucion\_Velocidad\_Calles\_Secundarias

Velocidad\_General\_Calles\_Sec

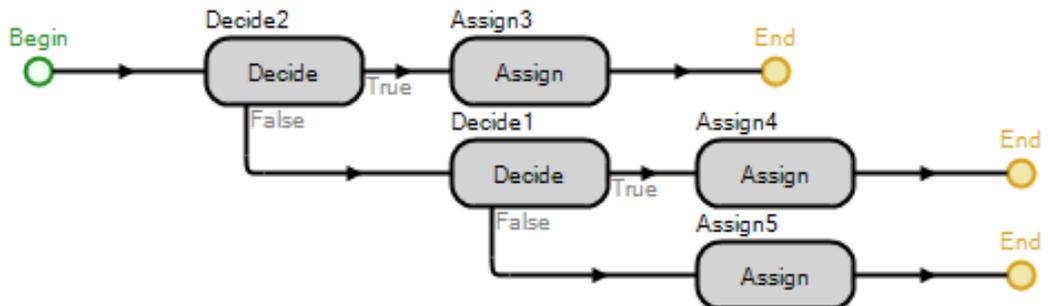


Figura 19. Lógica para la velocidad en calles secundarias

Elaboración: Propia

### Anexo 3. Restricción de las Áreas Residenciales

Restriccion\_urbanizaciones

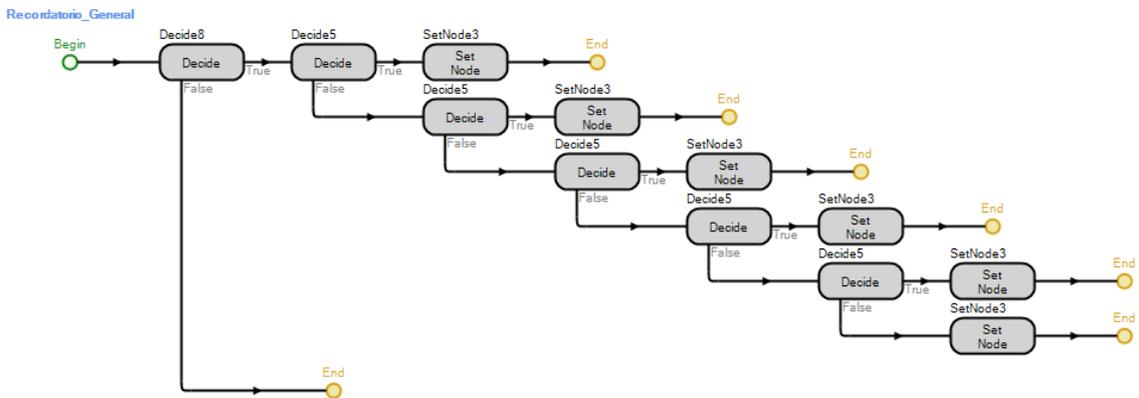


Figura 20. Lógica para los Vehículos Tipo B al entrar al área residencial

Elaboración: Propia

### Anexo 4. Asignación de la Variable Respuesta

Tiempo\_de\_Recorrido

Tiempo\_Recomido\_Vehiculo\_Tipo\_AyB

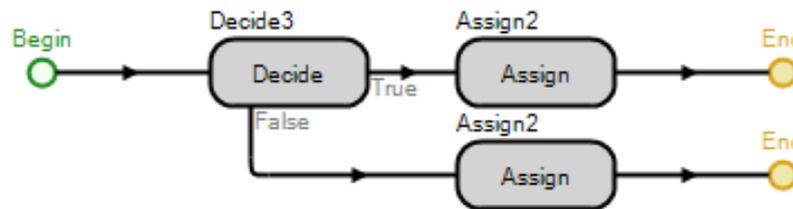


Figura 21. Lógica para asignar la variable respuesta a las entidades marcadoras

Elaboración: Propia

### Anexo 5. Asignación del Día de la Semana

Dia\_Semana

Asignacion\_Dia\_de\_la\_Semana

CambioDeDia.Event



<b>Basic Logic</b>	
State Variable Name	Dia_de_la_semana
New Value	Math.If(Dia_de_la_semana < 7, Dia_de_la_semana + 1,1)
Assignments (More)	0 Rows
<b>Advanced Options</b>	
<b>General</b>	

Figura 22. Lógica para asignar el día de la semana al modelo

Elaboración: Propia

Anexo 6. Procesos del Modelo Secundario

Estacionamiento\_Calle\_Cecilia\_Pico&Placa

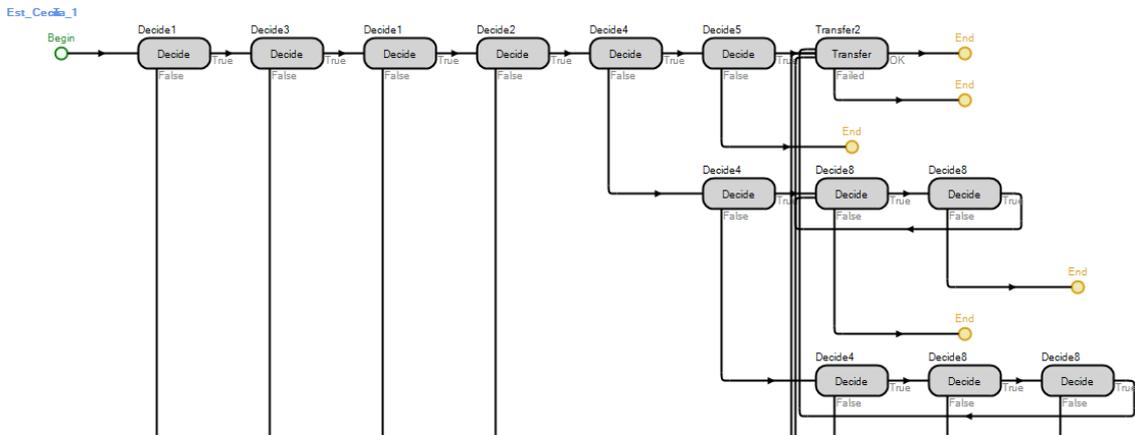


Figura 23. Lógica entrada a los estacionamientos al aplicar el Pico & Placa (parte 1 de 2)

Elaboración: Propia

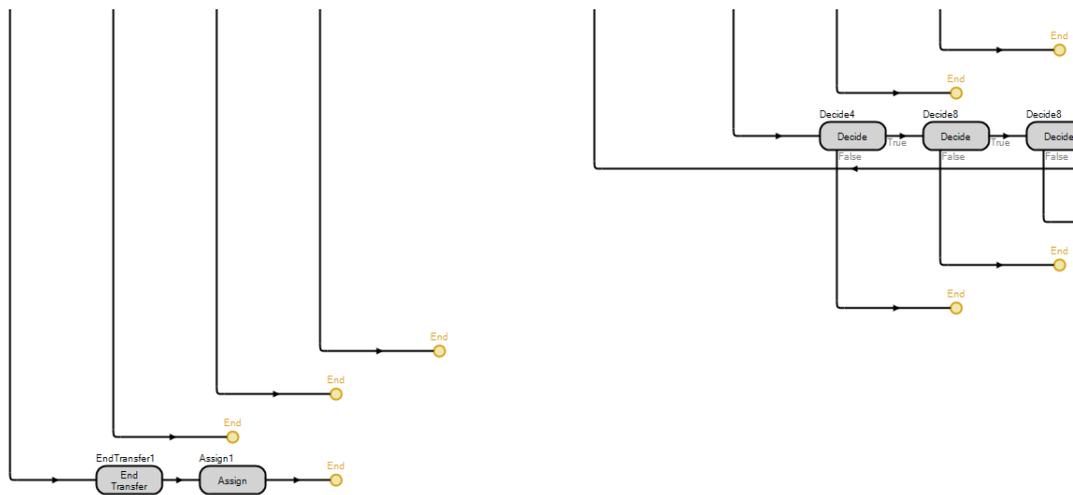


Figura 24. Lógica entrada a los estacionamientos al aplicar el Pico & Placa (parte 2 de 2)

Elaboración: Propia

Estacionamiento\_Calle\_Cecilia\_End\_TransfersEntered

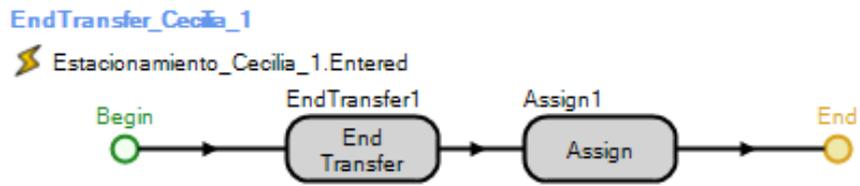


Figura 25. Lógica EndTransfer de las entidades de tráfico al entrar al estacionamiento

Elaboración: Propia

Estacionamiento\_Vaciado\_Calle\_Cecilia

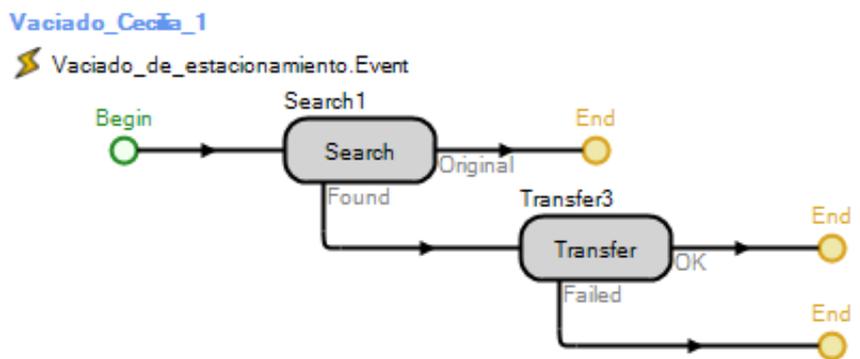


Figura 26. Lógica vaciado de los estacionamientos

Elaboración: Propia

Hora\_Pico

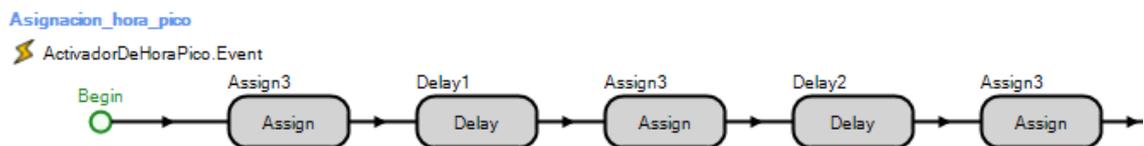


Figura 27. Lógica de la Hora Pico a la ciudad de SUCA (parte 1 de 2)

Elaboración: Propia



Figura 28. Lógica de la Hora Pico a la ciudad de SUCA (parte 2 de 2)

Elaboración: Propia

### Anexo 7. Rotondas e Intersecciones

#### Rotonda\_1

Cruce\_ext\_1\_1

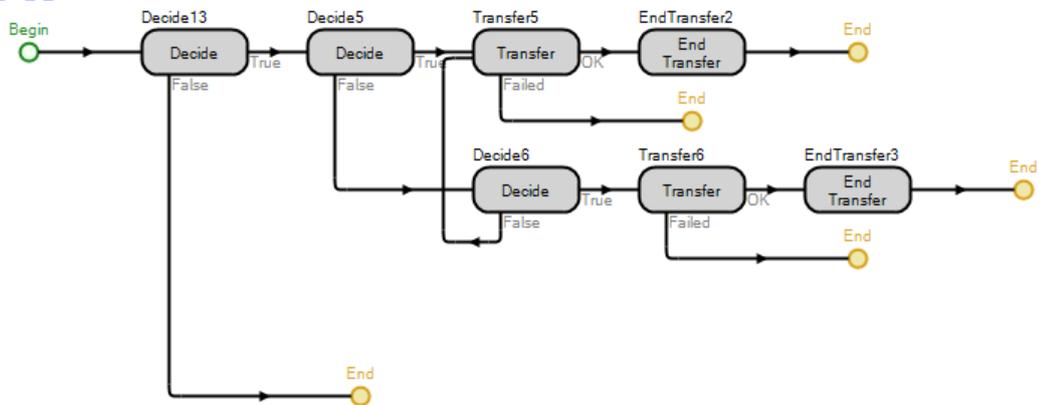


Figura 29. Lógica de las rotondas del modelo

Elaboración: Propia

#### Intersecciones\_tipo\_1

Interseccion\_10

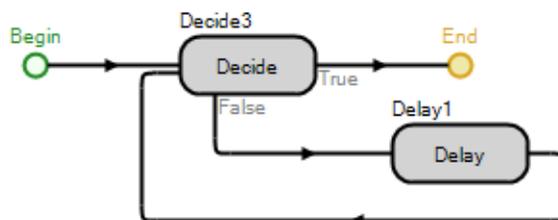


Figura 30. Lógica de las intersecciones del modelo

Elaboración: Propia

**Anexo 8. Verificación Estadística de los Resultados**

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1 S1VA	19,2667	30	1,7604	,3214
S2VA	19,4667	30	3,1919	,5828

**Paired Samples Correlations**

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 S1VA & S2VA	30	,124	,513

**Paired Samples Test**

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	S1VA - S2VA	-,2000	3,4481	,6295	-1,4876	1,0876	-,318	29	,753

**Figura 31. Escenario Uno Vehículo Tipo A - Escenario Dos Vehículo Tipo A**

Elaboración: Propia

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1 S1VA	19,2667	30	1,7604	,3214
S3VA	17,4333	30	3,0021	,5481

**Paired Samples Correlations**

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 S1VA & S3VA	30	-,225	,232

**Paired Samples Test**

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	S1VA - S3VA	1,8333	3,8064	,6949	,4120	3,2547	2,638	29	,013

**Figura 32. Escenario Uno Vehículo Tipo A - Escenario Tres Vehículo Tipo A**

Elaboración: Propia

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1 S2VA	19,4667	30	3,1919	,5828
S3VA	17,4333	30	3,0021	,5481

**Paired Samples Correlations**

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 S2VA & S3VA	30	-,043	,820

**Paired Samples Test**

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	S2VA - S3VA	2,0333	4,4759	,8172	,3620	3,7046	2,488	29	,019

Figura 33. Escenario Dos Vehículo Tipo A - Escenario Tres Vehículo Tipo A

Elaboración: Propia

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1 S1VB	44,7000	30	2,6672	,4870
S2VB	48,3667	30	3,4986	,6388

**Paired Samples Correlations**

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 S1VB & S2VB	30	-,032	,866

**Paired Samples Test**

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	S1VB - S2VB	-3,6667	4,4670	,8156	-5,3347	-1,9987	-4,496	29	,000

Figura 34. Escenario Uno Vehículo Tipo B - Escenario Dos Vehículo Tipo B

Elaboración: Propia

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1 S1VB	44,7000	30	2,6672	,4870
S3VB	43,7000	30	2,6672	,4870

**Paired Samples Correlations**

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 S1VB & S3VB	30	,423	,020

**Paired Samples Test**

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	S1VB - S3VB	1,0000	2,8648	,5230	-6,97E-02	2,0697	1,912	29	,066

**Figura 35. Escenario Uno Vehículo Tipo B - Escenario Tres Vehículo Tipo B**

Elaboración: Propia

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1 S2VB	48,3667	30	3,4986	,6388
S3VB	43,7000	30	2,6672	,4870

**Paired Samples Correlations**

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 S2VB & S3VB	30	-,128	,499

**Paired Samples Test**

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	S2VB - S3VB	4,6667	4,6634	,8514	2,9253	6,4080	5,481	29	,000

**Figura 36. Escenario Dos Vehículo Tipo B - Escenario Tres Vehículo Tipo B**

Elaboración: Propia

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	S1VA	19,2667	30	1,7604	,3214
1	VEHASA	22,8667	30	1,8889	,3449

**Paired Samples Correlations**

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	S1VA & VEHASA	30	-,196	,298

**Paired Samples Test**

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	S1VA - VEHASA	-3,6000	2,8235	,5155	-4,6543	-2,5457	-6,983	29	,000

**Figura 37. Escenario Control Vehículo Tipo A - Escenario Uno Vehículo Tipo A**

Elaboración: Propia

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	S2VA	19,4667	30	3,1919	,5828
1	VEHASA	22,8667	30	1,8889	,3449

**Paired Samples Correlations**

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	S2VA & VEHASA	30	-,230	,222

**Paired Samples Test**

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	S2VA - VEHASA	-3,4000	4,0650	,7422	-4,9179	-1,8821	-4,581	29	,000

**Figura 38. Escenario Control Vehículo Tipo A - Escenario Dos Vehículo Tipo A**

Elaboración: Propia

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1 S3VA	17,4333	30	3,0021	,5481
1 VEHASA	22,8667	30	1,8889	,3449

**Paired Samples Correlations**

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 S3VA & VEHASA	30	,357	,053

**Paired Samples Test**

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	S3VA - VEHASA	-5,4333	2,9206	,5332	-6,5239	-4,3428	-10,190	29	,000

Figura 39. Escenario Control Vehículo Tipo A - Escenario Tres Vehículo Tipo A

Elaboración: Propia

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1 S1VB	44,7000	30	2,6672	,4870
1 VEHBSA	51,7667	30	2,0625	,3766

**Paired Samples Correlations**

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 S1VB & VEHBSA	30	-,082	,666

**Paired Samples Test**

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	S1VB - VEHBSA	-7,0667	3,5030	,6396	-8,3747	-5,7586	-11,049	29	,000

Figura 40. Escenario Control Vehículo Tipo B - Escenario Uno Vehículo Tipo B

Elaboración: Propia

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1 S2VB	48,3667	30	3,4986	,6388
1 VEHBSA	51,7667	30	2,0625	,3766

**Paired Samples Correlations**

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 S2VB & VEHBSA	30	,050	,791

**Paired Samples Test**

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	S2VB - VEHBSA	-3,4000	3,9706	,7249	-4,8826	-1,9174	-4,690	29	,000

Figura 41. Escenario Control Vehículo Tipo B - Escenario Dos Vehículo Tipo B

Elaboración: Propia

**T-Test**

**Paired Samples Statistics**

	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1 S3VB	43,7000	30	2,6672	,4870
1 VEHBSA	51,7667	30	2,0625	,3766

**Paired Samples Correlations**

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 S3VB & VEHBSA	30	-,207	,271

**Paired Samples Test**

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	S3VB - VEHBSA	-8,0667	3,6947	,6746	-9,4463	-6,6871	-11,959	29	,000

Figura 42. Escenario Control Vehículo Tipo B - Escenario Tres Vehículo Tipo B

Elaboración: Propia