UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

"DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DENTRO DE UNA CIUDAD VIRTUAL DONDE TODOS LOS SEMAFOROS (DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN APLICADA) HAN SIDO SUSTITUIDOS POR ROTONDAS (SISTEMAS DE AUTOREGULACIÓN), 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: AUDRA VALSECCHI PELLICO.
DANIEL MARÍN ARMAS.

PROFESOR GUÍA: DR. HENRY GASPARÍN.

FECHA: MARZO 2011.

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

"DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DENTRO DE UNA CIUDAD VIRTUAL DONDE TODOS LOS SEMAFOROS (DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN APLICADA) HAN SIDO SUSTITUIDOS POR ROTONDAS (SISTEMAS DE AUTOREGULACIÓN), HACIENDO USO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN."

Este jurado, una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: Diecinueve (19)

JURADO EXAMINADOR

Firma: Nombre: Simy Blomer

Firma: Nombre: Henry Gasparín

Firma: Nombre: Javier Garcia

REALIZADO POR: AUDRA VALSECCHI PELLICO. DANIEL MARÍN ARMAS.

PROFESOR GUÍA: DR. HENRY GASPARÍN.

FECHA: MARZO 2011.

AGRADECIMIENTOS AUDRA

A Dios, por la vida, por la familia tan maravillosa que me has dado. Soy una persona afortunada de poder contar con todo el amor, salud y fortaleza que me has podido dar.

A todos mis familiares, especialmente a mis dos hermanos, Ander, por tu muestra de valor y perseverancia para conseguir tus sueños, por el humor y el carisma que trasmites en la casa a diario, a Esteban, por ser un ejemplo excepcional a seguir a lo largo de mi vida, por tu protección, amistad y apoyo incondicional desde que éramos niños. Son únicos en mi vida.

A mi nonno y a mi abuelo por su experiencia y sabiduría. Gracias especialmente a mi abuela Emilia, por su protección y cuidado en vida y desde el cielo. Son ángeles para mí, especialmente para ustedes desde mi corazón.

A mí nonna María, por ser una excelente persona, madre y abuela, por su amor, cariño, atención y apoyo incondicional en todo momento. Eres única y siempre estarás presente en mi vida y en mi corazón.

A mi querida Nana Yolanda, por sus consejos, por su honestidad y solidaridad. Gracias por el cariño, amor y dedicación que siempre has tenido con todos nosotros.

A todos y cada uno de mis amigos de La Salle y universidad, especialmente a María Isabel, Christian, Andrea, Araitz, Valentina y Pincha, por el gran cariño, ayuda, apoyo y amistad que me han brindado en todo momento desde que nos conocimos.

A nuestro tutor, Henry Gasparin, por darnos la oportunidad de trabajar en esta tesis y guiarnos durante el desarrollo de la misma.

A Cucho, por ser un excelente compañero y amigo. Gracias por tu, ayuda, apoyo y paciencia. Todo Salió mejor de lo Planeado, ¡Impossible is Nothing!.

Finalmente a lo más grande y especial que Dios me ha podido dar en mi vida, mis padres, Esteban y Magaly, incondicionales ejemplos de vida, gracias por ser mis mejores amigos siempre y en todo momento. Gracias por su paciencia, comprensión y entendimiento, por los mejores e inolvidables minutos que he podido compartir y disfrutar a su lado, son maravillosos, gracias por escucharme, por acompañarme y por siempre apoyarme y darme fuerzas ante todas las decisiones de mi vida. Todo lo que soy y he logrado en mi vida ha sido gracias a ustedes.

Audra Valsecchi Pellico.

AGRADECIMIENTOS DANIEL

A mis padres, (Mariu y Daniel), que me apoyaron y guiaron en todo momento y estuvieron ahí cuando los necesité, soy lo que soy gracias a ustedes.

A mis tíos, (Eutimio y Franklin), y sus familias que siempre me ayudaron y me echaron un ojo cuando vivía solo en Caracas, nunca me falto nada con ustedes cerca.

A mis hermanos, (Javier y Gabriel), que puedo contar con ustedes siempre.

A mis abuelos, (Tete, Yaya, Eutimio y Francisco), y otros familiares, (Asia, Guille, Raúl, Trina), que siempre estuvieron pendiente de mí, gracias por todo.

A mi compañera de tesis y amiga, Audra, por su amistad y todo su trabajo en esta tesis.

A nuestro tutor, Henry Gasparin, por darnos la oportunidad de trabajar en esta tesis y guiarnos durante el desarrollo de la misma.

Al CIDI y sus profesores que siempre nos ofrecieron su ayuda.

A todos mis panas integrantes de "Los siete machos", (Ramon, Riki, Juan Carlos, Mario, Alfredo y Simón), tremendos amigos con los que se puede contar siempre.

A mis amigos y compañeros de carrera Jose Guerra, Jorge, Trenzas, Valentina, Ga, Andrenie, Lisbeth, Renata, Paula, Oriana, Eli, Araitz, PM, Orlando, Daza, Elias, Joel, Nelson, Mari, Christian, Ulises y todos mis demás amigos de la promo 69 y 70, juntos recorrimos un gran camino.

Daniel Marín Armas.

DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DENTRO DE UNA CIUDAD VIRTUAL DONDE TODOS LOS SEMAFOROS (DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN APLICADA) HAN SIDO SUSTITUIDOS POR ROTONDAS (SISTEMAS DE AUTOREGULACIÓN), HACIENDO USO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN.

Autor: Audra Valsecchi Pellico.
Daniel Marín Armas.
Tutor: Dr. Henry Gasparín.
Año: 2011

SINOPSIS

Las necesidades de un mundo donde los países se dividen en desarrollados y subdesarrollados, en países de bajos y altos recursos, en sociedades dividas en estratos económicos, sociales o políticos, varían según estas mismas, divisiones que el mismo hombre ha ido haciendo al pasar de los años. Dentro de un mundo donde la tecnología avanza cada día más para fortalecer las grandes industrias y grandes mercados internacionales, dándole al ser humano una mejor calidad de vida. El crecimiento de la población en los últimos años se ha caracterizado por su irregularidad y desorden, esto trae como consecuencia ciudades poco planificadas para el futuro, las cuales no se encuentran con espacio suficiente para sus habitantes. Es por tal motivo que estas ciudades se enfrentan a serios problemas de transporte urbano debido al número creciente de vehículos en circulación, como las ciudades han llegado a ser los principales centros de actividades económicas, la población tiende a desplazarse a éstas. Tal concentración de personas requiere transporte no sólo para ellas mismas, sino también para los consumos que producen o consumen. Lamentablemente, la red vial puede generar diversos impactos ambientales adversos, tales como congestión vehicular, contaminación del aire, ruido e invasión de la tranquilidad en ciertas áreas, además la congestión vehicular puede incrementar el riesgo de accidentes viales.

El flujo vehicular producido en un momento y lugar determinado es el resultado de una serie de decisiones individuales de los usuarios de la red vial. Cada usuario decide cómo y cuándo recorrer lo que considera la mejor ruta para llegar a su destino. Sus decisiones pueden basarse en criterios tales como: costo, tiempo, seguridad y comodidad, así mismo el usuario debe decidir qué ruta recorrer y qué modo de transporte utilizar (automóvil, moto, transporte público, etc.), decisión que depende, entre otras cosas, de la congestión en los arcos o vialidades de la ruta. El tiempo de recorrido de cualquier ruta, desde un punto de origen a un punto de destino, es una función del flujo de la congestión total. Por lo tanto no es fácil determinar la ruta óptima en tiempo real en una red vial. Es por esto que ante una posible mejora del tránsito y los sistemas de distribución, se da fundamento a la continuación de un estudio ya dado anteriormente, se desarrolló un Trabajo Especial de Grado a continuación nombrado, **"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" desarrollado por Armas Daniela en el 2011. Actualmente tomando como base y partiendo de este Trabajo Especial de Grado, se desea seguir con la línea de investigación dándole un enfoque nuevo al modelo, ahora se estudiará el comportamiento de una ciudad donde todos los semáforos han sido sustituidos por rotondas, se crearán distintos algoritmos tanto estáticos como dinámicos que permitan obtener las mejores rutas de distribución, al variar aleatoriamente los distintos puntos de destino activos, seleccionados dentro de la ciudad virtual. El presente Trabajo Especial de Grado contempla la identificación de varias variables que influyen en una red vial, las cuales serán aplicadas en la construcción de un modelo de simulación y un algoritmo computacional que nos permitirán obtener, a través de un estudio de 5 experimentos, con 4 escenarios para cada uno de los mismos, las rutas óptimas para los distintos centros de distribución que se encuentren activos.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS AUDRA i

AGRADECIMIENTOS DANIEL ii

ÍNDICE GENERAL v

ÍNDICE DE TABLAS ix

ÍNDICE DE GRÁFICOS x

INTRODUCCIÓN 1

CAPITULO I. ESTUDIO PRELIMINAR 3

I.1. Planteamiento del Problema. 3

I.2. Justificación. 5

I.3. Objetivos. 6

I.4. Alcance del Trabajo Especial de Grado. 6

I.5. Limitaciones del Trabajo Especial de Grado. 7

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO 8

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO 15

CAPÍTULO IV. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN LOS TIEMPOS DE DISTRIBUCIÓN 17

IV.1 Variables de la Red Vial 17

IV.2 Variables de las Rotondas. 18

IV.3 Variables del Sistema de Distribución. 22

IV.4 Variable del Tiempo de Recorrido Entidad de Transporte (Variable Respuesta). 22

CAPÍTULO V. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO 23

V.1 Asignación de Valores a las Variables. 23

V.2 Diseño del Modelo. 28

V.3 Verificación del Modelo. 32

CAPÍTULO VI. CONSTRUCCIÓN DEL ALGORITMO DE RUTA ÓPTIMA 33

VI.1. Algoritmo de Ruta Óptima. 33

CAPÍTULO VII. DISEÑO DE LOS ESCENARIOS EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES DETERMINADAS 40

VII. 1. Descripción General. 40

VII.2. Experimentos Realizados. 41

CAPÍTULO VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS 49

CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES 55

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 57

ANEXOS xi

Anexo1. Procesos Internos del Modelo. xi

Anexo 2. Programación de las Intersecciones. xii

Anexo 3. Programación de las Rotondas. xiii

Anexo 4. Programación del Sistema de Distribución. xxi

Anexo 5. Proceso Anti-Stuck. xxii

Anexo 6. Resultados Obtenidos para el Experimento 1, Escenario 1 xxiii

Anexo 7. Pseudocódigo Algoritmo de Ruta Óptima. xxv

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Intersección Giratoria de La Castellana, Caracas, Venezuela. 10
Figura 2. Señales P-4 (Proximidad rotonda), R-402 (Sentido giratorio obligado) y Diagrama de Peligro por puntos en Intersección a Nivel y Rotonda. 12
Figura 3. Representación de las calles y sentidos de la red vial propuesta. 24
Figura 4. Ubicación de las rotondas en la red vial propuesta. 26
Figura 5. Ubicación del centro y de los puntos de distribución. 27
Figura 6. Representación en el modelo de rotondas tipo 1, (a la izquierda), y tipo 2, (a la derecha). 28
Figura 7. Propiedades de un path representando una calle principal. 29
Figura 8. Representación en el modelo de la red vial con rotondas y puntos de distribución. 31
Figura 9. Ejemplo algoritmo de caminos mínimos, grafo inicial. 35
Figura 10. Ejemplo algoritmo de caminos mínimos. 35
Figura 11. Ejemplo algoritmo de caminos mínimos. Secuencia de Ruta Finalizada. 36
Figura 12. Modelo de simulación recorrido mínimo a los centros de distribución dentro de una ciudad virtual. 37
Figura 13. Matriz de Distancias Mínimas. 38
Figura 14. Interfaz Algoritmo de Ruta Óptima. 39
Figura 15. Listado de Procesos en el Modelo, (parte 1 de 2). xi
Figura 16. Listado de Procesos en el Modelo, (parte 2 de 2). xi
Figura 17. Lógica de las Intersecciones. xii
Figura 18. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 1 de 8). xiii
Figura 19. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 2 de 8). xiv
Figura 20. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 3 de 8). xv
Figura 21. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 4 de 8). xvi
Figura 22. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 5 de 8). xvii
Figura 23. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 6 de 8). xvii
Figura 24. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 7 de 8). xviii
Figura 25. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 8 de 8). xviii

Figura 26. Lógica de Asignación de Destinos, (parte 1 de 2). xix
Figura 27. Lógica de Asignación de Destinos, (parte 2 de 2). xix
Figura 28. Lógica de salidas de las rotondas, (parte 1 de 2). xx
Figura 29. Lógica de Salidas de las Rotondas, (parte 2 de 2). xx
Figura 30. Lógica del Sistema de Distribución. xxi
Figura 31. Lógica del Proceso Anti-Stuck. xxii
Figura 32. Parámetros del Experimento 1, Escenario 1 xxiii
Figura 33. Resultados del experimento 1, escenario 1. xxiv
Figura 34. Pseudocódigo de Ruta óptima (parte 1 de 5) xxv
Figura 35. Pseudocódigo de Ruta óptima (parte 2 de 5) xxvi
Figura 36. Pseudocódigo de Ruta óptima (parte 3 de 5) xxvi
Figura 37. Pseudocódigo de Ruta óptima (parte 4 de 5) xxvii
Figura 38. Pseudocódigo de Ruta óptima (parte 5 de 5) xxvii

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Presentación de la metodología para el desarrollo del Trabajo Especial de Grado..... 15
Tabla 2. Velocidades de circulación para el diseño de una rotonda..... 19
Tabla 3. Radios de curvatura para el diseño de curvas en áreas urbanas..... 20
Tabla 4. Tiempos de recorrido de la entidad de transporte en los escenarios planteados. 32
Tabla 5. Secuencia de Ruta propuesta para cada uno de los escenarios existentes en el Experimento 1. 42
Tabla 6. Tiempo de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), en el Experimento 1.... 42
Tabla 7. Secuencia de Ruta propuesta para cada uno de los escenarios existentes en el Experimento 2. 43
Tabla 8. Tiempo de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), en el Experimento 2.... 44
Tabla 9. Secuencia de Ruta propuesta para cada uno de los escenarios existentes en el Experimento 3. 45
Tabla 10. Tiempo de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), en el Experimento 3.... 45
Tabla 11. Secuencia de Ruta propuesta para cada uno de los escenarios existentes en el Experimento 4. 46
Tabla 12. Tiempo de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), en el Experimento 4.... 47
Tabla 13. Secuencia de Ruta propuesta para cada uno de los escenarios existentes en el Experimento 5. 48
Tabla 14. Tiempo de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), en el Experimento 5.... 48
Tabla 15. Comparación en Promedio de los Tiempos de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima). 54

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Grafica 1. Tiempo de Recorrido para cada escenario existente (Experimento I). Elaboración: Propia 2011 49
Grafica 2. Tiempo de Recorrido para cada escenario existente (Experimento II). Elaboración: Propia 2011 50
Grafica 3. Tiempo de Recorrido para cada escenario existente (Experimento III) 51
Grafica 4. Tiempo de Recorrido para cada escenario existente (Experimento IV) 52
Grafica 5. Tiempo de Recorrido para cada escenario existente (Experimento IV) 53
Grafica 6. Comparación Tiempo de Recorrido Promedio para cada escenario existente (Todos los Experimentos de Estudio) 54

INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Especial de Grado tiene como finalidad determinar las mejores rutas de distribución, dentro de una ciudad virtual donde todos los semáforos (dispositivos de regulación aplicada) han sido sustituidos por rotondas (sistemas de auto regulación), haciendo uso de un modelo de simulación representativo de una red vial, se hallarán todas las rutas óptimas a los centros de distribución que se encuentran activos, creando y haciendo uso de algoritmos y programas computacionales.

La metodología empleada consistió en la determinación de las mejores rutas de distribución, dentro de una ciudad virtual donde todos los semáforos han sido sustituidos por rotondas. La estructura del trabajo será la siguiente a continuación detallada:

Capítulo I. Estudio Preliminar: Contempla el inicio de la documentación para el estudio del Trabajo Especial de Grado, detalla el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos; general y específicos, el alcance y las limitaciones del Trabajo Especial de Grado.

Capítulo II. Marco Teórico: Contiene todas las definiciones y términos necesarios para la adecuada comprensión del Trabajo Especial de Grado.

Capítulo III. Marco Metodológico: Presenta la metodología seguida para la ejecución del Trabajo Especial de Grado.

Capítulo IV. Determinación de las Variables que afectan los Tiempos de Distribución: Presenta la identificación y determinación de todas las variables que afectan los tiempos de distribución del modelo e influyen en la red vial.

Capitulo V. Construcción del Modelo de Simulación: Diseño de un modelo de simulación que representa la red vial propuesta, estableciendo los valores de las variables determinadas en el capítulo anterior, expone también la verificación del modelo.

Capítulo VI. Construcción del Algoritmo de Ruta Óptima: Contempla el desarrollo de un algoritmo de ruteo, que dado un punto de origen y la selección aleatoria de los diferentes puntos de encuentro, se podrá determinar la ruta óptima que debe seguir el sistema de distribución.

Capítulo VII. Diseño y presentación de los Escenarios en función de las Variables Determinadas: Contiene el estudio y selección de los escenarios que serán reproducidos en el modelo de simulación.

Capítulo VIII. Análisis de Resultados: Contiene el análisis de los resultados obtenidos en todos los escenarios existentes.

Capítulo IX. Conclusiones: Contempla cuales son las mejores rutas de distribución dentro de una ciudad virtual, con base a un estudio de 5 experimentos, donde cada uno consta de 4 escenarios, generando un total de 20 escenarios existentes que nos permitan obtener y validar la Ruta Optima en el modelo.

CAPITULO I. ESTUDIO PRELIMINAR

I.1. Planteamiento del Problema.

El crecimiento desordenado de la población en distintas ciudades del planeta ha traído como consecuencia un alto número de vehículos que circulan por estas mismas, y si se tiene en cuenta que generalmente estas ciudades no habían sido planificadas para manejar este volumen vehicular se hace necesario el uso de distintas herramientas que permitan disminuir al máximo el tráfico vehicular.

Hay muchas aproximaciones matemáticas que intentan modelar el flujo de tráfico vehicular en términos de alguna de sus características. Todas ellas responden con cierto grado de apego a la realidad, midiendo alguna o algunas características del flujo vehicular, que pueden ser de utilidad en un futuro no muy lejano.

Una de las opciones para reducir el tráfico vehicular es sustituir los semáforos, (dispositivos de regulación aplicada), por rotondas, (dispositivos de autorregulación); una rotonda consiste en una plaza, con una vía circular alrededor, a la que se unen distintas vías, y posee dos simples reglas:

- El sentido de giro por la rotonda en países donde se conduce por el lado derecho de la vía es anti horario y horario en los demás países.
- Tienen prioridad los vehículos que están circulando dentro de la rotonda.

La principal ventaja de este mecanismo de autorregulación es la de controlar la velocidad de los vehículos que la atraviesan, debido a que el radio de la misma obliga a no superar cierta velocidad, aunque en algunos casos ofrece mayor fluidez al evitar la necesidad de semáforos.

Anteriormente en el año 2000, el ayuntamiento del municipio Amorebieta-Etxano de España, puso en marcha una iniciativa de sustituir todos los semáforos por rotondas, pasarelas para peatones y señales de "Ceda el Paso". De esta forma a una década de empezar este proyecto se han obtenido distintos beneficios como es el caso de una reducción de accidentes en 80%, ahorro energético y en mantenimiento de semáforos. Teniendo en cuenta todos los beneficios mencionados anteriormente se desea simular el comportamiento de un sistema de distribución dentro de una ciudad virtual antes de poder poner en práctica un proyecto tan grande y complejo.

El problema del ruteo o encaminamiento empieza hace mucho tiempo con el Problema del Vendedor Viajero, (TSP por sus siglas en ingles), el cual dice: "*Si un viajante parte de la ciudad A y las distancias a todas las demás ciudades son conocidas, ¿cuál es la ruta óptima que debe elegir para visitar todas las ciudades y volver a la ciudad de partida?*", este problema no posee solución desde el punto de vista práctico pero si soluciones aproximadas aceptables desde el punto de vista teórico. Luego aparece el Problema de Rutas de Vehículos, (VRP), el cual se podría decir que es una evolución del TSP.

Existen diversos algoritmos de enrutamiento que permiten obtener la mejor ruta, la cual es aquella que cumple con las siguientes condiciones:

- Consigue mantener acotado el retardo entre pares de nodos de la red.
- Consigue ofrecer altas cadencias efectivas independientemente del retardo medio de tránsito.
- Permite ofrecer el menor costo.

El criterio más sencillo es elegir el camino más corto, es decir la ruta que pasa por el menor número de nodos. Una generalización de este criterio es el de "coste mínimo".

Los algoritmos de enrutamiento pueden ser estáticos, los cuales no toman en cuenta el estado de la red al momento de tomar las decisiones. Ó dinámicos, que se caracterizan por ser más tolerantes a cambios en la red como variaciones en el tráfico, incremento del retardo o fallas en la topología, y se caracterizan por intercambiar información de la red para tomar las mejores decisiones.

Anteriormente se desarrolló un Trabajo Especial de Grado, "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" desarrollado por Armas Daniela en el 2011. Actualmente tomando como base y partiendo de este Trabajo Especial de Grado, se desea seguir con la línea de investigación pero siguiendo un enfoque distinto, ahora se examinará el comportamiento de una ciudad donde todos los semáforos han sido sustituidos por rotondas, y también se crearán distintos algoritmos tanto estáticos como dinámicos que permitan obtener las mejores rutas de distribución al variar aleatoriamente los distintos puntos que conformaran la ruta.

En el trabajo mencionado anteriormente establece que "En los sistemas de distribución, es de vital importancia implementar de manera adecuada la logística y el transporte para la selección de la mejor ruta entre puntos dados, para cada escenario, por la que se realizará el recorrido para la entrega y/o recogida de los productos entre las diferentes localizaciones. Se deben optimizar aspectos tales como calidad, cantidad y flexibilidad en la distribución, así como minimizar los tiempos y costos, tomando en consideración las restricciones de los clientes.

Dentro de las tareas de una empresa, el transporte absorbe la mayor parte de los costos, por lo que cualquier mejora que pueda realizarse en este ámbito representará un ahorro importante para las mismas."

Es por todo lo antes expuesto que surge la siguiente interrogante:

¿Se puede mejorar un sistema de distribución al crear algoritmos de enrutamiento dinámicos, que permitan al transporte tomar las mejores rutas en cada escenario?

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

I.2. Justificación.

Ante una posible mejora del tránsito, (al sustituir los semáforos por rotondas), y de los sistemas de distribución, (al crear algoritmos de enrutamiento), en una ciudad virtual es importante como futuros ingenieros avocarse al estudio y desarrollo de nuevas alternativas, siendo esta línea de investigación una oportunidad de dar un significativo aporte en esta área.

Este Trabajo Especial de Grado tiene como beneficios, emplear los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, haciendo uso de las herramientas necesarias para el desarrollo de la investigación. Por otro lado, permite el aprendizaje y la aplicación de la metodología para llevar a cabo investigaciones científicas, lo cual es fundamental para la creación de profesionales capaces de proporcionar nuevos conocimientos, e innovar. Dicho trabajo puede representar una alternativa que permita solventar el problema del tráfico vehicular y de los sistemas de distribución presente y futuro en Venezuela.

I.3. Objetivos.

I.3.1. Objetivo General.

Determinar las mejores rutas de distribución 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.

I.3.2. Objetivos Específicos.

I.3.2.1. Generar un modelo de simulación representativo de una ciudad virtual con rotondas.

I.3.2.2. Generar un algoritmo que interactúe con el simulador para establecer la mejor ruta entre puntos dados para cada escenario.

I.3.2.3. Determinar las variables que puedan afectar los tiempos de distribución.

I.3.2.4. Diseñar escenarios en función de las variables que afectan los tiempos de distribución.

I.3.2.5. Analizar los resultados obtenidos de los diferentes escenarios.

I.4. Alcance del Trabajo Especial de Grado.

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 ruta entre puntos dados teniendo en cuenta el tráfico en tiempo real, para cada escenario, al sustituir todos los semáforos por rotondas, haciendo uso de un algoritmo heurístico para la determinación de las pre-rutas de distribución.

Se propone que la ciudad virtual en la que se basará el proyecto conste de un mínimo de 7 calles verticales y 7 calles horizontales. Así mismo, existirán 15 paradas para la ruta de distribución, considerando el centro de distribución. Esta ciudad virtual habrá sustituido todos los semáforos por rotondas.

I.5. Limitaciones del Trabajo Especial de Grado.

El estudio del proceso de distribución se limita a la obtención de los resultados arrojados de un Trabajo Especial de Grado que anteriormente se desarrolló, "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", así como también la obtención de resultados producidos al sustituir todos los semáforos de una ciudad virtual por rotondas, sin contemplar la implementación de los cambios sugeridos por los mismos.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se explicará un poco algunos términos importantes a emplear en el desarrollo del Trabajo Especial de Grado.

Red Vial: Las vías, los caminos, las calles son parte de un sistema de comunicación que permite la circulación de los medios de transportes colectivos y privados. (Manual de Organización Local para Situaciones de Emergencia 1992).

Intensidad de Tráfico: Número de Vehículos que pasan por una determinada sección de calle o carretera en una unidad de tiempo. (Ingeniería de Transito. España 1982).

Velocidad Local (VL): Es la velocidad de un vehículo al atravesar una determinada sección de una vía. (Ingeniería de Transito. España 1982).

Velocidad de Circulación (Vc): Es igual a la distancia recorrida en un tramo determinado, dividida por el tiempo en que el vehículo esta en movimiento. (Ingeniería de Transito. España 1982).

Velocidad de Recorrido (Vr): Es el cociente entre la distancia total recorrida en un tramo determinado y el tiempo que transcurre desde el instante en que el vehículo inicia el viaje hasta que llega a su destino incluyendo las posibles detenciones y retrasos debido al tráfico. (Ingeniería de Transito. España 1982).

Densidad Vehicular: Numero de vehículos por una determinada longitud, siendo un valor instantáneo, también puede expresarse como el valor medio de varias situaciones sucesivas. Se llama crítica cuando alcanza la máxima capacidad y varía con el tipo de carretera. (Ingeniería de Transito. España 1982).

Seguridad Vial: La seguridad vial consiste en la prevención de accidentes de tránsito o la minimización de sus efectos. Es el respeto por la propia vida y la de los demás. (Comisario Europeo del Automóvil 2010).

Avenidas: Las avenidas están orientadas de este a oeste. Si no existe ningún dispositivo de control, ni alguna autoridad en la intersección, los vehículos que circulen por la avenida tendrán prioridad de paso (Manual de Tránsito 2003).

Calles: Mantienen un sentido de norte a sur y tienen prioridad sobre las avenidas, únicamente cuando son vías principales, o cuando esa prioridad se las otorga una autoridad o un dispositivo de regulación (Manual de Tránsito 2003).

Vías Principales: Es aquella arteria que según número de vehículos que por ella circulan diariamente, por el número de carriles o por ambas razones, se convierte en una vía de prioridad (Manual de Tránsito 2003).

Vías Secundarias: Son vías secundarias aquellas no conceptuadas como principales.

Semáforo: Dispositivo de señales eléctrico o mecánico que regula el flujo de vehículos y peatones en las intersecciones de caminos. El tipo más frecuente tiene tres luces de colores: verde, para avanzar, rojo para detenerse, y amarillo o ámbar como paso intermedio del verde a rojo. El ámbar tiene un significado distinto si esta intermitente (pasar con precaución) ó si está fijo (detenerse, si la velocidad que llevemos nos lo permite con seguridad. (Resolución Ministerial Republica del Perú).

Intersección a Nivel: Es la confluencia de varias vías, por las que el trafico se mueve en diversas direcciones. Las intersecciones de mucho movimiento están reguladas por un "semáforo", pero no están controladas. (U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration 2008).

Intersección giratoria o Rotonda: Intersección dotada de un obstáculo central, materialmente infranqueable y rodeado por una calzada anular con sentido de circulación giratorio a derechas sobre la que confluyen varias calles, que se rige por una especial regla 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. (Funciones de las rotondas urbanas y requerimientos urbanísticos de organización España 2009).

Figura 1. Intersección Giratoria de La Castellana, Caracas, Venezuela.

Fuente: "Archivo FM Center Reporte del tráfico, 2010".

Islote Central: Mantiene una forma circular por razones de dominio entre las diferentes ramas, o bien oval o elíptica siempre que su excentricidad sea moderada, sin embargo puede adoptar formas muy diversas como sucede en algunos casos de acondicionamientos, como plazas o situaciones que así lo exigían debido a la disposición de los ramales. El valor medio del tamaño está comprendido entre los 20 y los 40 metros de diámetro. Para diámetros superiores a 40 metros la rotonda puede ser considerada como grande y del mismo modo rotondas con diámetros inferiores a 20 metros se pueden considerar pequeñas. (Funciones de las rotondas urbanas y requerimientos urbanísticos de organización España 2009)

Calzada anular: Elección del número de vías de la calzada anular se debe principalmente a:

- Número de carriles de las vías a empalmar.

- Tráfico.
- Giro de los vehículos.
- Decisión del acondicionamiento.

La anchura de la calzada anular será de:

- 5-6 metros para un solo carril.
- 8 metros es el óptimo para calzadas con dos carriles.
- 11-12 metros permite la utilización de tres carriles en el anillo.

El aumento en la anchura de la calzada anular se debe al aumento de la capacidad general de la rotonda. A pesar de que no es una práctica generalizada y algunas recomendaciones europeas no lo aprueban, es importante que se señale la separación longitudinal, entre carriles de la calzada anular mediante líneas blancas discontinuas, así como los límites interior y exterior de la misma mediante línea blanca continua. (Funciones de las rotondas urbanas y requerimientos urbanísticos de organización España 2009)

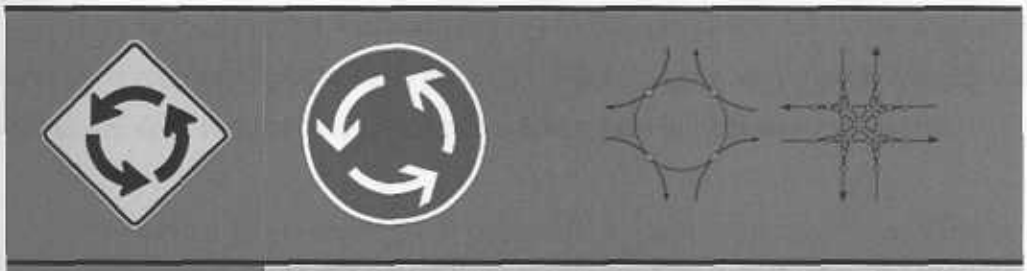
Perfil longitudinal: Debe ser llano, según la situación se deberá adaptar al perfil del terreno, sin embargo, se recomienda encarecidamente que la calzada anular esté en un solo plano. En caso extremo las pendientes y rampas de la calzada anular resultantes no deben superar el 3%. Es prioritario un buen acuerdo entre la calzada anular y la de las vías que confluyen en ella, por lo que se puede llegar a situaciones en las que el perfil longitudinal de la calzada anular sea más inclinado. (Funciones de las rotondas urbanas y requerimientos urbanísticos de organización España 2009)

Ramales: Se recomienda sea de repartición regular entre los ramales entorno al anillo, mientras que se desaconseja que una entrada y la siguiente salida se encuentren muy próximas. Es conveniente comprobar que una salida no se encuentra alineada directamente con una salida a fin de que el obstáculo central imponga una deflexión en la trayectoria reduciendo así la velocidad en la aproximación y en el interior de la intersección. (Funciones de las rotondas urbanas y requerimientos urbanísticos de organización España 2009)

Entradas: 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. (Funciones de las rotondas urbanas y requerimientos urbanísticos de organización España 2009)

Salidas: El diseño de las salidas debe permitir que los vehículos circulantes por el anillo puedan abandonarlo sin producir ninguna alteración en el resto de vehículos que circulan por él, todo esto también sin incitar a un aumento de la velocidad al abandonar la calzada anular. (Funciones de las rotondas urbanas y requerimientos urbanísticos de organización España 2009)

Señalización: El sentido de giro por la rotonda o vía circular en países donde conducen por el lado derecho es hacia la izquierda u anti horario. Tienen prioridad los vehículos que ya están circulando dentro de la rotonda, (prioridad a la izquierda si la norma obliga circular por la derecha y viceversa), al contrario que en los cruces normales



Señal que indica la proximidad de una rotonda.	Señal indicando rotonda en sentido anti horario.	Diagrama mostrando los puntos donde podrían suceder accidentes o choques en una rotonda (izquierda) y una intersección (derecha).

Figura 1. Señales P-4 (Proximidad rotonda), R-402 (Sentido giratorio obligado) y Diagrama de Peligro por puntos en Intersección a Nivel y Rotonda.

Fuente: "U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration 2008".

Algoritmo de Ruteo: Construyen la tabla de ruteo, a partir de la cual luego se construye la tabla de forwardeo. La red se puede ver como un grafo donde cada router

es un nodo y donde cada enlace entre routers es un eje. Viéndolo de este modo, el ruteo se reduce al cálculo de los caminos mínimos de un nodo a los demás. (ComputaciónUBA 2002).

Teoría de Grafos: Grafo simple G(V,E) consta de V, un conjunto no vacío de vértices, y de E, un conjunto de pares no ordenados de elementos distintos de V. A esos pares se les llama aristas o lados. Un multígrafo dirigido G(V,E) consta de un conjunto V de vértices, un conjunto E de aristas y una función f de E en $\{(u, v)|u, v \in V\}$. Se dice que las aristas e1, e2 son aristas múltiples o paralelas si f(e1) = f(e2).

Archivo.TXT: Archivo informático compuesto únicamente por texto sin formato, sólo caracteres. Estos caracteres se pueden codificar de distintos modos dependiendo de la lengua usada.

Optimización: Consiste en minimizar o maximizar el valor de una variable. En otras palabras se trata de calcular o determinar el valor mínimo o el valor máximo de una función de una variable. Se debe tener presente que la variable que se desea minimizar o maximizar debe ser expresada como función de otra de las variables relacionadas en el problema. En ocasiones es preciso considerar las restricciones que se tengan en el problema, ya que éstas generan igualdades entre las variables que permiten la obtención de la función de una variable que se quiere minimizar o maximizar.

Simulación: Es el desarrollo de un modelo lógico-matemático de un sistema, de tal forma que se obtiene una imitación de la operación de un proceso de la vida real o de un sistema a través del tiempo. Sea realizado a mano o en una computadora, la simulación involucra la generación de una historia artificial de un sistema; la observación de esta historia mediante la manipulación experimental, nos ayuda a inferir las características operacionales de tal sistema (Simulación y Análisis de Modelos Estocásticos, Azarang M).

Modelo: Consiste en generar un código lógico-matemático que defina en forma exacta las interacciones entre las variables; debe ser una definición sencilla pero completa del sistema. Al generar las interacciones es importante tener en cuenta que se va a llevar a cabo a través del tiempo y que el uso de listas o cadenas de eventos darán la pauta en el manejo de las variables (Simulación y Análisis de Modelos Estocásticos, Azarang M).

Software SIMIO: Es un paradigma único multi-herramienta de modelado que combina la simplicidad de los objetos con la flexibilidad de los procesos para proporcionar una capacidad de modelado rápido sin necesidad de programación. Rompe las barreras tradicionales de software de simulación, tiene el poder de construir rápidamente modelos precisos de animación 3D y analizar objetivamente las alternativas para tomar decisiones informadas con mayor rapidez.

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

Según Carlos Muñoz Razo en su libro "Como elaborar y asesorar una investigación de tesis" (1998), este Trabajo Especial de Grado presenta una investigación del tipo documental, en la cual se hace uso de un modelo de simulación de eventos discretos, para estudiar rutas de distribución variables en una ciudad virtual, donde todos los semáforos han sido sustituidos por rotondas.

A continuación se presenta la tabla 1, la cual contiene en forma resumida la metodología utilizada, dividida en 6 fases que permitieron llevar a cabo el Trabajo Especial de Grado.

Tabla 1. Presentación de la metodología para el desarrollo del Trabajo Especial de Grado.

Fase	Capítulo	Actividades	Objetivos
1	**Capítulo IV. Determinación de las variables que afectan los tiempos de distribución**	Realizar una investigación en fuentes bibliográficas especializadas en el área	Obtener la información necesaria para el proceso en estudio
		Identificar las variables que puedan afectar los tiempos de distribución	Determinar las variables que afectan al sistema, así como la variable respuesta
		Identificar la variable respuesta del modelo	
2	**Capítulo V. Construcción del modelo de simulación**	Establecer los valores de las variables determinadas anteriormente	Construir el modelo de simulación
		Diseñar el modelo de simulación representando la red vial	
		Verificar el modelo de simulación en base a la variable respuesta	Verificar el modelo de simulación

3	**Capítulo VI. Construcción del algoritmo de ruta óptima**	Desarrollar un algoritmo que permita obtener la secuencia de ruta, entre los diferentes centros de distribución activos	Determinar la ruta óptima que debe seguir el sistema de distribución
4	**Capítulo VII. Diseño de los escenarios en función de las variables determinadas**	Estudiar y escoger que escenarios serán reproducidos en el modelo de simulación	Establecer los escenarios que serán analizados en el trabajo de grado.
5	**Capítulo VIII. Análisis de Resultados**	Analizar los resultados obtenidos en los distintos escenarios	Realizar un análisis sobre los resultados obtenidos
6	**Capítulo IX. Conclusiones**	Plantear si las rutas encontradas son las mejores para cada conjunto de escenarios	Determinar si las rutas de distribución son las mejores para cada conjunto de escenarios

Elaboración: Propia 2011.

CAPÍTULO IV. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN LOS TIEMPOS DE DISTRIBUCIÓN

El objetivo del modelo a realizar es simular una red vial que represente una ciudad virtual, donde todos los semáforos han sido sustituidos por rotondas. Esta red cuenta con 25 puntos de distribución y un centro de distribución o centro de origen, lugar donde la entidad llamada "entidad de transporte" iniciará la secuencia de ruta correspondiente. Para el experimento se hará que una entidad de transporte circule por la red visitando los distintos puntos de distribución activos, los cuales serán escogidos de forma aleatoria, a través de un algoritmo de ruteo. Mientras que otras entidades llamadas "entidades de tráfico" circulan por la red, con el objetivo de que la red vial se asemeje a una red vial real.

Para la primera fase se deberán determinar las distintas variables que afectan al sistema de distribución, estas se encontrarán distribuidas de la siguiente manera: variables de la red vial, variables de las rotondas y variables del sistema de distribución. Así como también la variable del tiempo de recorrido (variable respuesta).

IV.1 Variables de la Red Vial.

Estas variables se relacionan directamente con las características y especificaciones del diseño y circulación de las distintas entidades dentro de la ciudad virtual.

IV.1.1 Tamaño de la Red, Sentido y Calles.

Para poder diseñar la red vial, es necesario y se debe de limitar el tamaño de la misma, así como también se deberá definir el número de calles y el sentido que le corresponde.

IV.1.2 Tamaño de las Cuadras.

El tamaño de las cuadras viene relacionado con el ancho y largo de las cuadras, motivo por el cual se afectará directamente la distancia recorrida por la entidad de transporte y las entidades de tráfico.

IV.1.3 Velocidad de Transito.

Con respecto a la velocidad de transito, es de suma importancia tener en cuenta que la misma se ajuste a los reglamentos de transito correspondientes, para así, poder aumentar la exactitud de la simulación.

IV.1.4 Volumen de Transito.

El volumen de transito corresponde a la cantidad de vehículos que pasan por una calle durante un período de tiempo específico, es por esto que no todas las calles poseen el mismo volumen de transito. Dependiendo del tiempo asignado, existirán mayor o menor número de entidades de tráfico circulando en la red vial, lo que traerá como consecuencia un aumento o disminución en el volumen.

IV.2 Variables de las Rotondas.

Para las rotondas de igual manera existirán variables que influyen en el diseño y funcionamiento de estas mismas.

IV.2.1 Variables de Diseño.

Entre las variables del diseño existen diversos elementos que componen a una rotonda, su diseño esta estrictamente apegado a distintas reglas, que serán de suma importancia en el momento de seleccionar el lugar y ubicación adecuados de las rotondas dentro de la ciudad virtual.

IV.2.1.1 Velocidad de Diseño.

En las rotondas, los vehiculos dan vueltas alrededor de una isla central. Esto representa una solución al tráfico basándose en bajas velocidades relativas y de circulación continua del flujo vehicular. En general el funcionamiento de las rotondas es mejor cuando

el volumen de tránsito en todas las ramas de intersección es aproximadamente igual y el volumen de vehículos no excede los 3000 vehículos por hora.

Se puede decir que la velocidad de diseño, es la velocidad a la que circulan los vehículos dentro de la rotonda, debe ser cercana a la velocidad de entrada a la rotonda para evitar cambios drásticos en las velocidades y de esta forma evitar accidentes. La relación entre la velocidad de circulación y la velocidad de entrada a los accesos se muestra en la siguiente tabla.

En una rotonda los vehículos deben operar a velocidad uniforme para efectuar los entrecruzamientos desde los distintos accesos, sin conflictos serios. La velocidad de diseño de una rotonda debe seleccionarse previamente y empalmar todos los elementos del trazado uniformemente a dicha velocidad, ésta no debe diferir mucho de lo normal de los accesos a la Intersección, ya que de lo contrario se obliga a una reducción importante de la misma, el peligro se incrementa y la utilidad de la rotonda como intersección desaparece.

A continuación en la tabla 2 se presentan las velocidades de diseño de acuerdo a la velocidad de los accesos.

Tabla 2. Velocidades de circulación para el diseño de una rotonda.

Velocidad de diseño de los accesos (Km/h)	Velocidad media de operación de los accesos (Km/h)	Velocidad de diseño de la rotonda (Km/h)	
		Mínima	Deseable
50	43	30	45
65	45	45	55
80 o más	65 a 80	50	65

Fuente. "Manual de diseño geométrico para carreteras".
Elaboración: Propia 2011.

IV.2.1.2 Trazado de los Accesos.

El adecuado trazado de los accesos influye en el buen funcionamiento de la rotonda, debe considerarse que la velocidad media en los accesos debe ser aproximadamente igual a la velocidad de diseño de la misma. Para esto se hace necesario reducir gradualmente la velocidad de tránsito en los accesos, modificando el trazado de las intersecciones e incluyendo la adecuada señalización.

IV.2.1.3 Radio de la Rotonda.

El radio de curvatura de una rotonda está determinado por la velocidad de circulación para la cual fue diseñada la misma, en la siguiente tabla se muestra la relación entre radio de curvatura y la velocidad de circulación mínima correspondiente.

Tabla 3. Radios de curvatura para el diseño de curvas en áreas urbanas.

Radio (m)	Velocidad de circulación mínima(km/h)
35	30
60	40
100	50
150	60
215	70
280	80
375	90

Fuente. "Manual de diseño geométrico para carreteras".
Elaboración: Propia 2011.

Es importante resaltar que el trazado de curvatura de una rotonda debe limitarse según ciertas reglas prácticas. Por ejemplo, para una velocidad de diseño de 56 Kph, es necesario un radio mínimo de 150 m, lo que significa que el radio exterior de la rotonda sería de unos 170 m aproximadamente. Estos tamaños son casi siempre impracticables y prohibitivos, además de no ser cómodos para los conductores debido al gran recorrido que se ven obligados a realizar. En casos semejantes es preferible reducir la diferencia de velocidades entre los accesos y la rotonda, situando con la debida anticipación a la entrada de la misma, señales, islas y otros medios de control.

IV.2.1.2 Trazado de los Accesos.

El adecuado trazado de los accesos influye en el buen funcionamiento de la rotonda, debe considerarse que la velocidad media en los accesos debe ser aproximadamente igual a la velocidad de diseño de la misma. Para esto se hace necesario reducir gradualmente la velocidad de tránsito en los accesos, modificando el trazado de las intersecciones e incluyendo la adecuada señalización.

IV.2.1.3 Radio de la Rotonda.

El radio de curvatura de una rotonda está determinado por la velocidad de circulación para la cual fue diseñada la misma, en la siguiente tabla se muestra la relación entre radio de curvatura y la velocidad de circulación mínima correspondiente.

Tabla 3. Radios de curvatura para el diseño de curvas en áreas urbanas.

Radio (m)	Velocidad de circulación mínima(km/h)
35	30
60	40
100	50
150	60
215	70
280	80
375	90

Fuente. "Manual de diseño geométrico para carreteras".
Elaboración: Propia 2011.

Es importante resaltar que el trazado de curvatura de una rotonda debe limitarse según ciertas reglas prácticas. Por ejemplo, para una velocidad de diseño de 56 Kph, es necesario un radio mínimo de 150 m, lo que significa que el radio exterior de la rotonda sería de unos 170 m aproximadamente. Estos tamaños son casi siempre impracticables y prohibitivos, además de no ser cómodos para los conductores debido al gran recorrido que se ven obligados a realizar. En casos semejantes es preferible reducir la diferencia de velocidades entre los accesos y la rotonda, situando con la debida anticipación a la entrada de la misma, señales, islas y otros medios de control.

IV.2.1.4 Ubicación de las Rotondas.

Al momento de decidir la ubicación de las rotondas, se debe determinar en cuales intersecciones se va a colocar una rotonda, para esto, es necesario tomar en cuenta las variables mencionadas anteriormente, ya que las mismas, afectan de forma directa la decisión de asignar una ubicación a las rotondas.

IV.2.2 Variables de Funcionamiento.

Para el funcionamiento de las rotondas, existen diversas reglas de circulación dentro de las mismas, que logran obtener un flujo vial adecuado para la entidad de transporte y las distintas entidades de tráfico. Estas reglas se enumeran a continuación:

1. El vehículo que circula dentro de la rotonda tiene prioridad sobre el que se dispone a entrar, por tanto este último deberá ceder el paso.

2. Los vehículos deben circular a la velocidad constante que se indique en las señalizaciones.

3. Para ingresar a la rotonda cada vehículo se ubicará en el respectivo canal de acceso.

4. Para salir de la rotonda:
   a. Si se va a salir de la rotonda en la primera salida el vehículo deberá circular por el carril externo.
   b. Si la salida se va a realizar por la segunda salida el vehículo puede circular por cualquier canal.
   c. Si se va a abandonar por cualquier otra salida el vehículo deberá circular por el canal más interno.

5. No está permitido cambiar de canal dentro de la rotonda excepto en las maniobras de entrada y salida.

6. No está permitido rebasar a otro vehículo dentro de la rotonda.

IV.3 Variables del Sistema de Distribución.

En el funcionamiento del sistema de distribución, se entiende que el mismo contempla una entidad de transporte, la cual realizará un recorrido o secuencia de ruta asignada por los distintos puntos de distribución del sistema, posteriormente regresará al centro de distribución o centro de origen, lugar donde se da inicio a la secuencia de ruta.

IV.3.1 Cantidad de Puntos de Distribución.

Para determinar la cantidad de puntos de distribución que serán activados aleatoriamente en la secuencia de ruta por el algoritmo de ruteo, es necesario encontrar el número total de puntos de distribución, que la entidad de transporte podría visitar dentro de la ciudad virtual, donde existirán a su vez entidades de tráfico que tratarán de simular un flujo de red vial real.

IV.3.2 Ubicación de los Puntos de Distribución y del Centro de Distribución.

Para poder crear las distintas secuencias de ruta que seguirá la entidad de transporte, se debe conocer con anterioridad la ubicación de cada uno de los puntos de distribución dentro de la ciudad virtual, así como también del centro de distribución o centro de origen.

IV.3.3 Velocidad de la Entidad de Transporte.

Es la velocidad a la que va a circular la entidad de transporte por la red vial.

IV.4 Variable del Tiempo de Recorrido Entidad de Transporte (Variable Respuesta).

Como variable del tiempo de recorrido de la entidad de transporte o variable respuesta, se entiende como tiempo de recorrido el tiempo que tarda la entidad de transporte en visitar los puntos de distribución deseados y volver al centro de distribución o centro de origen.

CAPÍTULO V. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

V.1 Asignación de Valores a las Variables.

La primera parte contempla el proceso de establecer los valores de las variables determinadas anteriormente. Por motivos de comparación se asignaran valores similares a los utilizados en el Trabajo Especial de Grado, "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" desarrollado por Armas Daniela en el 2011, los cuales son obtenidos del "Manual de diseño geométrico de carreteras" de Perú. Para investigaciones futuras en Venezuela se recomienda utilizar los valores descritos en el manual "Normas para el proyecto de carreteras UTC 1997".

V.1.1 Variables de la Red Vial.

V.1.1.1 Tamaño de la Red, Sentido y Calles.

Se decidió limitar la red vial a 36 cuadras, 7 calles verticales y 7 calles horizontales, en la siguiente figura se pueden ver las calles y sus sentidos.

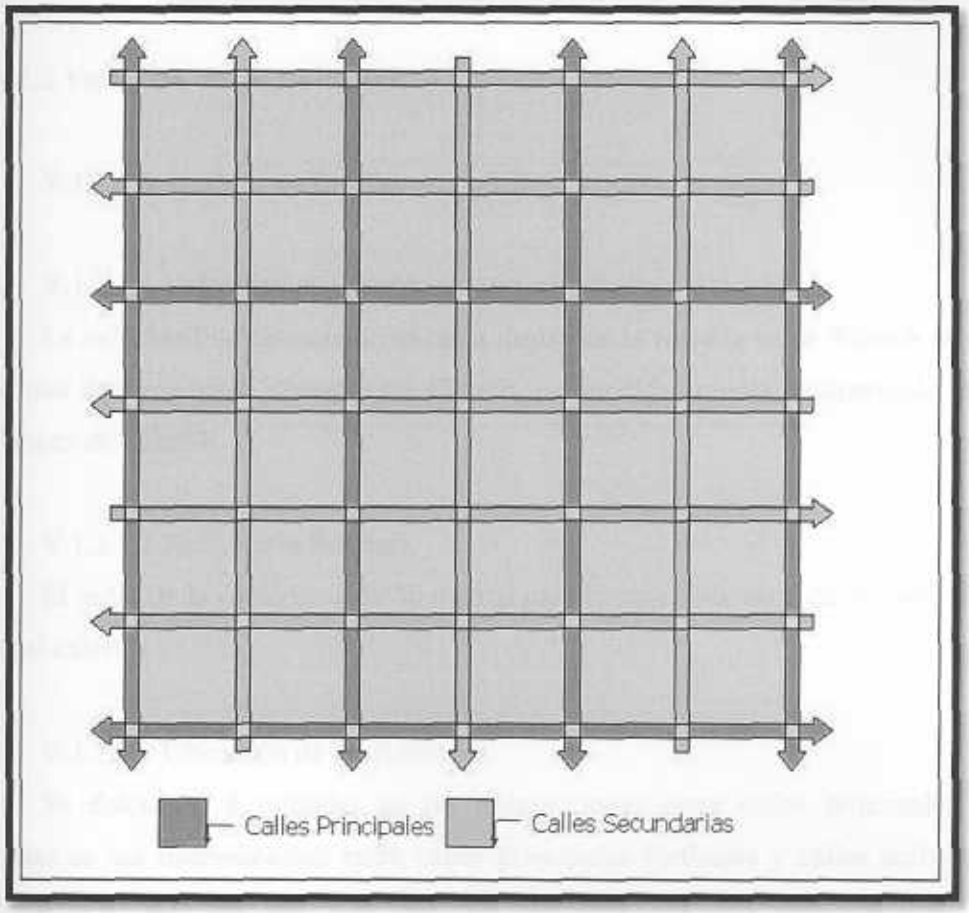


Figura 3. Representación de las calles y sentidos de la red vial propuesta. Elaboración: Propia 2011.

V.1.1.2 Tamaño de las Cuadras.

Se decidió diseñar las cuadras de 200 metros de ancho por 200 metros de largo.

V.1.1.3 Velocidad de Transito.

La velocidad de transito de las entidades de tráfico va a ser determinado por la siguiente distribución TRIANGULAR (40, 50, 60) kilómetros por hora. Las calles principales tienen una velocidad máxima de 60km/h y las calles secundarias 45km/h.

V.1.1.4 Volumen de Transito.

Se escogieron 2 tasas de llegada, para las calles principales una tasa de 400 vehículos por hora, y para las calles secundarias 300 vehículos por hora.

V.1.2 Variables de las Rotondas

V.1.2.1 Variables de Diseño.

V.1.2.1.1 Velocidad de Diseño.

La velocidad de circulación mínima dentro de la rotonda es de 30km/h con una velocidad de circulación deseable de 45km/h, la velocidad media de operación en los accesos es de 43km/h.

V.1.2.1.2 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.

V.1.2.1.3 Ubicación de las Rotondas.

Se colocaron 8 rotondas en las intersecciones entre calles principales, y 8 rotondas en las intersecciones entre calles principales verticales y calles horizontales con sentido hacia la derecha.

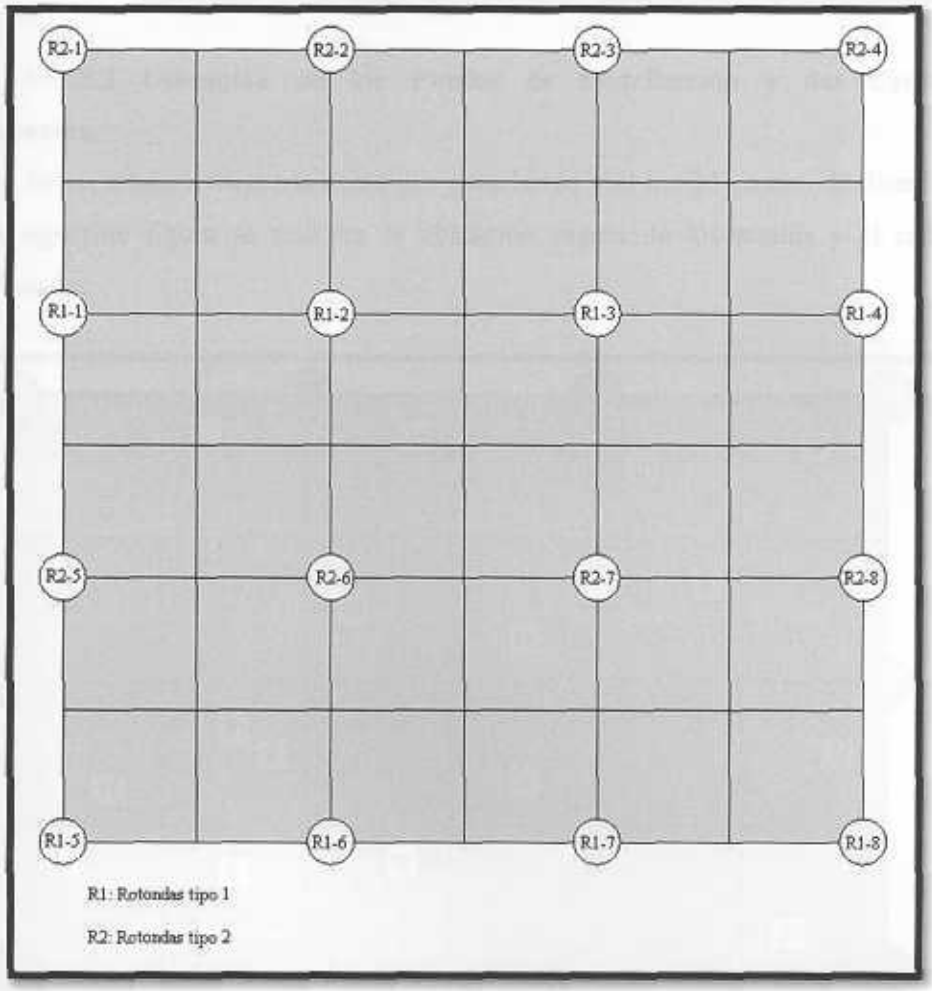


Figura 4. Ubicación de las rotondas en la red vial propuesta.
Elaboración: Propia 2011.

V.1.2.2 Variables de Funcionamiento.

Las reglas de funcionamiento fueron programadas en los procesos lógicos del software simio y se exhiben en los anexos.

V.1.3 Variables del Sistema de Distribución.

V.1.3.1 Cantidad de Puntos de Distribución.

Se crearon 25 puntos de distribución y un centro de distribución.

V.1.3.2 Ubicación de los Puntos de Distribución y del Centro de distribución.

Se repartieron aleatoriamente por toda la red vial los 25 puntos de distribución. En la siguiente figura se muestra la ubicación exacta de los puntos y el centro de distribución.

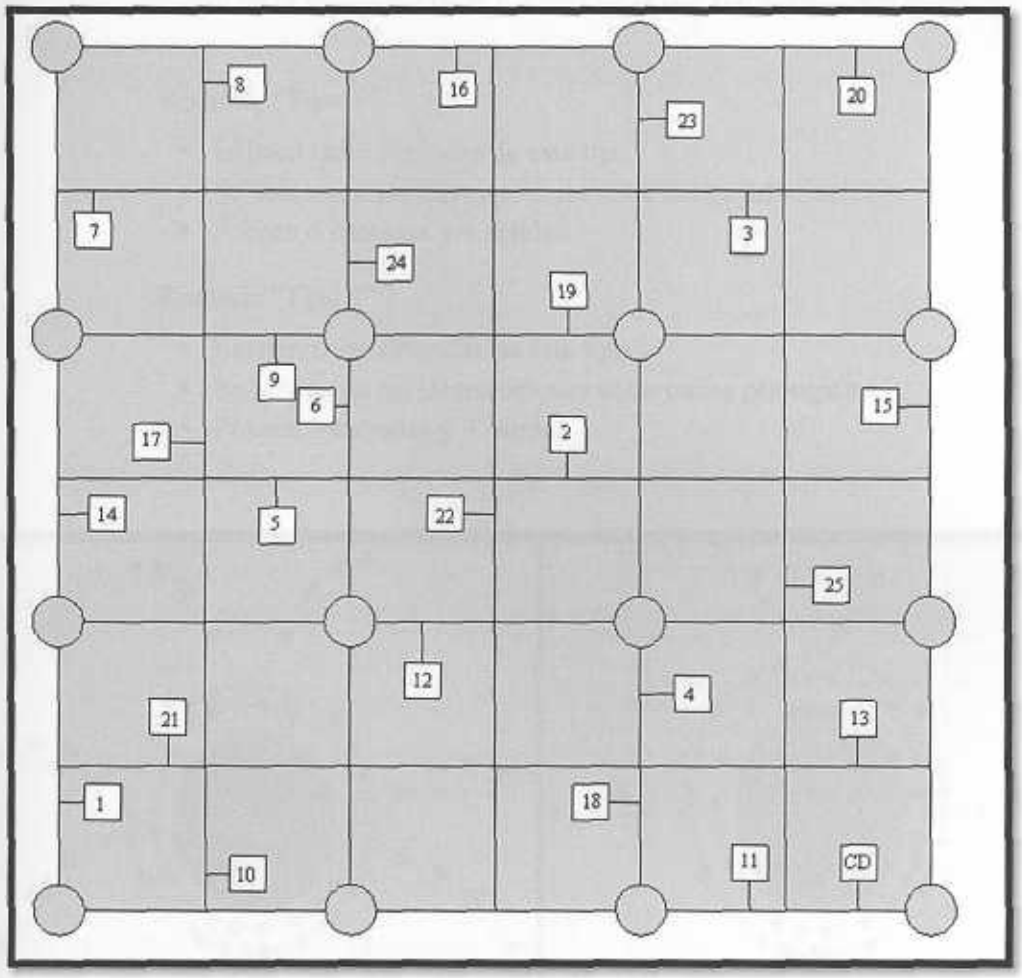


Figura 5. Ubicación del centro y de los puntos de distribución.
Elaboración: Propia 2011.

V.1.3.3 Velocidad de la Entidad de Transporte.

La velocidad de transito de la entidad de transporte va a ser determinado por la siguiente distribución TRIANGULAR (40, 50, 60) kilómetros por hora.

V.2 Diseño del Modelo.

La segunda parte de este capítulo consiste en crear el modelo de simulación que represente una red vial, para esto se utiliza el software de simulación simio.

V.2.1 Creación de las Rotondas

Dependiendo de la ubicación de la rotonda en la red vial existen dos tipos:

Rotonda "Tipo 1"

- Existen ocho rotondas de este tipo.
- Se ubican en las intersecciones entre calles principales.
- Poseen 4 entradas y 4 salidas.

Rotonda "Tipo 2"

- Existen ocho rotondas de este tipo.
- Se ubican en las intersecciones entre calles principales.
- Poseen 3 entradas y 3 salidas.

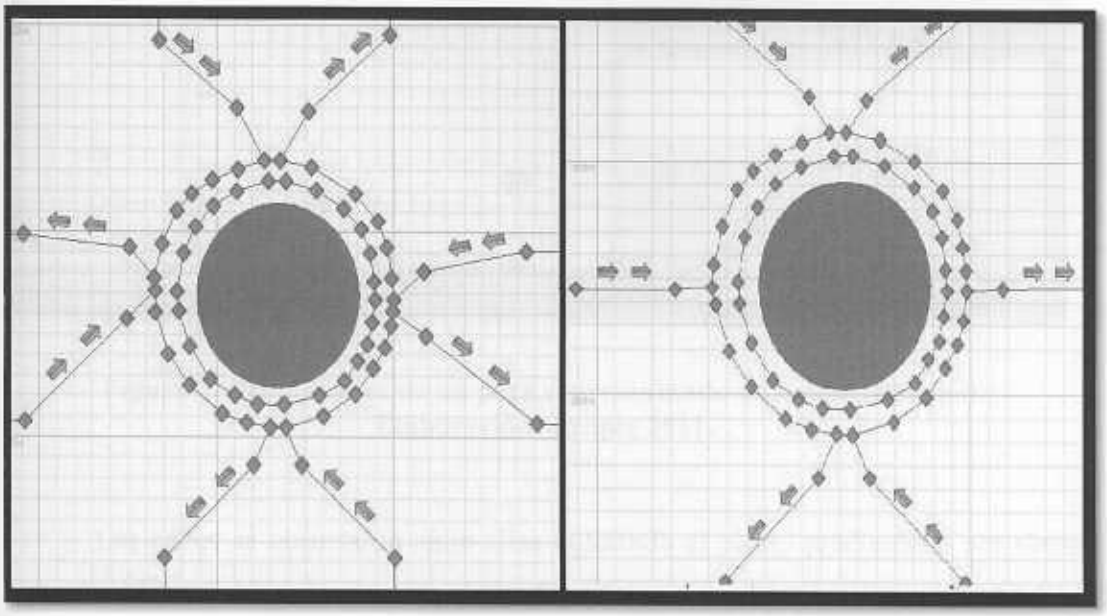


Figura 6. Representación en el modelo de rotondas tipo 1, (a la izquierda), y tipo 2, (a la derecha).
Elaboración: Propia 2011.

V.2.2 Creación de la Red Vial

Para la creación de las calles se utilizó el conector prediseñado por simio denominado "Path", a cada path o calle se le asignaron los valores de las variables determinados anteriormente.

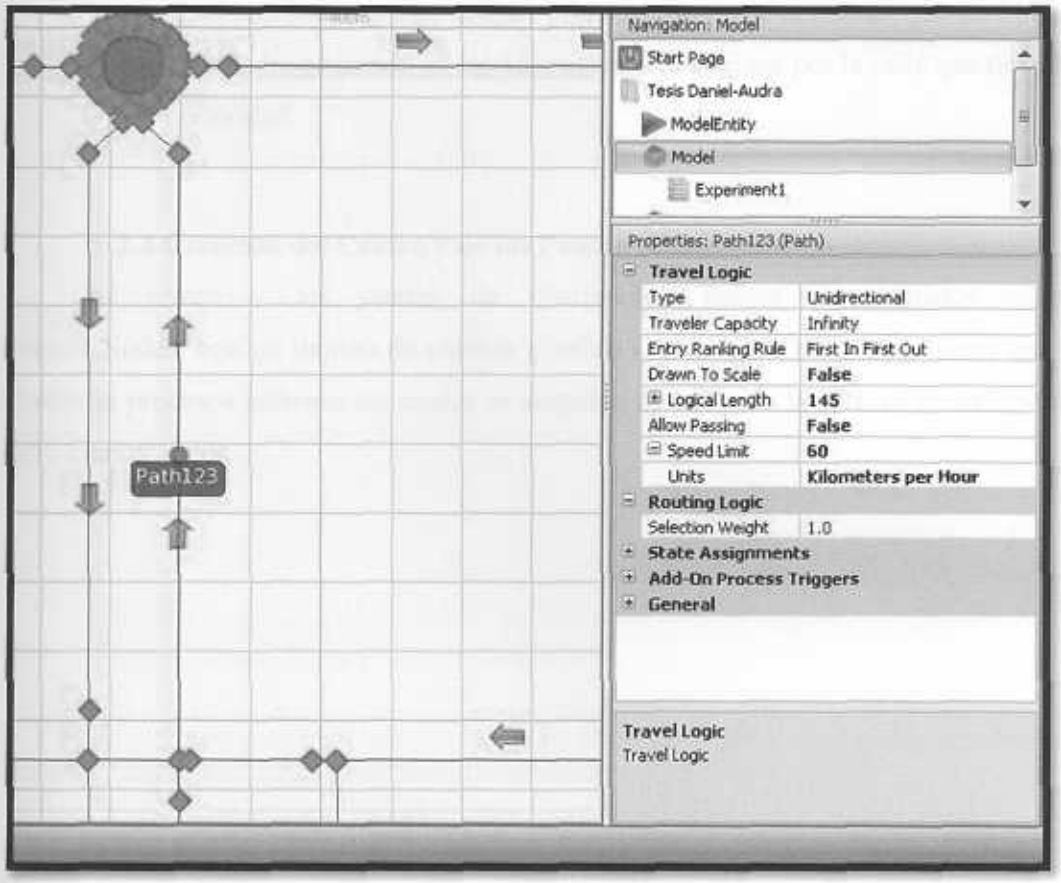


Figura 7. Propiedades de un path representando una calle principal.
Elaboración: Propia 2011.

Las calles se conectaron entre ellas utilizando el objeto prediseñado por simio llamado "TransferNode", estos también funcionan como intersecciones y permiten llamar a un proceso externo cuando una entidad entra o sale de este nodo.

Los procesos externos se encargan tanto de incorporar las lógicas de funcionamiento de la red vial como del correcto funcionamiento del modelo.

V.2.3 Creación de las Intersecciones

La prioridad de cruce en intersecciones se rige bajo la siguiente forma:

1. Las calles principales tienen prioridad sobre las calles secundarias.
2. Las calles secundarias verticales tienen prioridad sobre las calles secundarias horizontales.
3. Las entidades que no tengan prioridad de cruce revisarán que no hallan entidades cruzando en los 15m anteriores al cruce por la calle que tiene la prioridad.

V.2.4 Creación del Centro y de los Puntos de Distribución

El centro y los puntos de distribución fueron representados como TransferNodes, con un tiempo de entrada y salida a cada nodo de 0,1seg. También se añadieron procesos externos los cuales se aseguran de que solo la entidad de transporte entre a estos nodos.

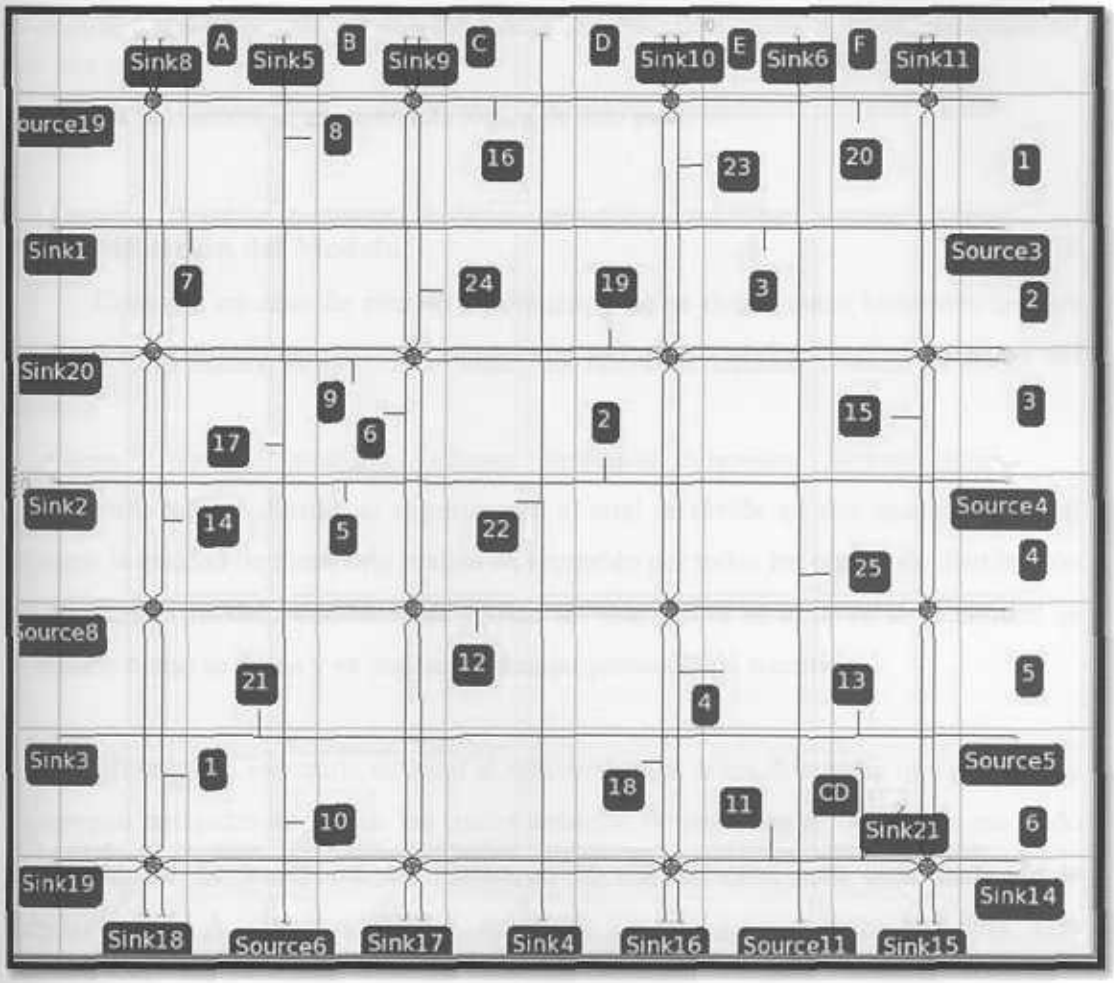


Figura 8. Representación en el modelo de la red vial con rotondas y puntos de distribución.
Elaboración: Propia 2011.

V.2.5 Proceso Anti-Stuck

Se determinó un error de memoria como consecuencia del gran número de entidades las cuales activaban demasiados procesos externos por segundo esto generaba una falla en el programa y en el funcionamiento del modelo, esta falla ocasionaba que algunas entidades que se encontraban en cola en una intersección no aceleraran una vez que la primera entidad en la cola arrancara. Para corregir el error se le añadió un proceso cíclico a las entidades que se activa desde el momento en que son creadas.

El proceso consiste en preguntar cada 3seg si la entidad tiene velocidad 0km/h si es así asigna velocidad TRIANGULAR (40, 50, 60) Km/h.

Se comprobó también que las lógicas en las intersecciones no fueran afectadas por este proceso.

En los anexos se encuentra la lógica de este proceso.

V.3 Verificación del Modelo.

Como es un caso de estudio hipotético, y no se tienen datos históricos con los que validar el funcionamiento del modelo se procedió a realizar una verificación del modelo.

Para esto se diseño un experimento el cual se divide en dos escenarios, en el primero la entidad de transporte realiza un recorrido por todos los puntos de distribución sin agregar al modelo entidades de tráfico de esta forma se observa si la entidad se comporta como se desea y se registra el tiempo promedio de recorrido.

El segundo escenario es igual al anterior con la única diferencia que a éste sí se le agregan entidades de tráfico las cuales deberían de aumentar el tiempo de recorrido de la entidad de transporte. Se realizaron 30 replicaciones para cada parte de la verificación. A continuación se muestran los resultados obtenidos para esta verificación.

Tabla 4. Tiempos de recorrido de la entidad de transporte en los escenarios planteados.

Escenario	Recorrido (seg)
Sin Entidades de Tráfico	2480,37
Con Entidades de Tráfico	2910,12

Elaboración: Propia 2011

Se puede ver que existe un incremento de 429,75seg en el tiempo de recorrido de la entidad de transporte en el segundo escenario esto es un aumento de casi el 15% en el tiempo. Por lo tanto se ha comprobado que el modelo funciona como se desea.

CAPÍTULO VI. CONSTRUCCIÓN DEL ALGORITMO DE RUTA ÓPTIMA

El siguiente capítulo contempla la construcción de un algoritmo de ruteo, cuyo principal objetivo es buscar un camino entre todos los posibles puntos de distribución existentes en una red virtual, donde los mismos poseen una gran conectividad entre ellos. Dado que se trata de encontrar la mejor ruta posible, lo primero será definir qué se entiende por mejor ruta y en consecuencia cuál es la métrica o distancia que separa cada uno de los puntos de distribución.

Se entiende por mejor ruta, aquella que consigue mantener acotado el retardo entre pares de puntos de distribución dentro de la red vial, ofrece alternativas de ruta independientemente del retardo medido por el tránsito de las entidades de tráfico, permite obtener el menor costo de ruta por secuencia de puntos establecida, logrando así la obtención de la menor distancia entre puntos de distribución. El criterio más sencillo es elegir el camino más corto, es decir la ruta que pasa por el menor número de nodos.

El algoritmo de ruteo utilizado tiene como finalidad arrojar la secuencia de ruta óptima o mejor ruta, tomando como base para el estudio, un conjunto aleatorio de 15 puntos de distribución, los cuales se encuentran activos dentro de los 25 puntos existentes en la ciudad virtual. Para el desarrollo de este algoritmo se hizo uso de un programa computacional llamado Netbeans extensión "Java SE".

VI.1. Algoritmo de Ruta Óptima.

VI.1.1. Descripción General.

Para determinar las mejores rutas o rutas óptimas a los centros de distribución que se encuentran activos dentro de la ciudad virtual, se implemento un algoritmo de ruteo denominado "Algoritmo de Ruta Óptima", el cual tiene como objetivo principal asignar de forma eficiente al modelo de simulación, una secuencia de ruta óptima para obtener la mejor ruta de distribución, disminuyendo significativamente el tiempo de recorrido de la entidad de transporte.

Este algoritmo nace como base de un algoritmo ya existente, denominado "Algoritmo de Dijkstra", también llamado algoritmo de caminos mínimos. El algoritmo Dijkstra es un algoritmo para la determinación del camino más corto dado un vértice origen, al resto de vértices en un grafo con pesos en cada arista. Su nombre se refiere a Edsger Dijkstra, quien lo describió por primera vez en 1959.

La idea subyacente en este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos más cortos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino más corto desde el vértice origen, al resto de vértices que componen el grafo, el algoritmo se detiene. Este algoritmo es una especialización de la búsqueda de costo uniforme, y como tal, no funciona en grafos con aristas de costo negativo o en el caso del algoritmo de ruta óptima, distancias negativas (sentido contrario). Al elegir siempre el nodo con distancia menor, pueden quedar excluidos de la búsqueda nodos que en próximas iteraciones bajarían el costo general del camino al pasar por una arista con costo negativo. Este algoritmo utiliza un tipo de estructura de colas, llamado "Cola de Prioridad". Una cola de prioridad es una estructura de datos indicado por una prioridad asociada a cada uno.

A continuación en la figura 9 y 10 se presenta un ejemplo de una secuencia de ruta hallada con el algoritmo de Dijkstra o algoritmo de caminos mínimos. Los puntos de color rojo representan las aristas y vértices pertenecientes a la solución o secuencia de ruta óptima, los puntos de color azul las aristas o vértices candidatos y los puntos de color negro son las aristas y vértices que se encuentran disponibles.

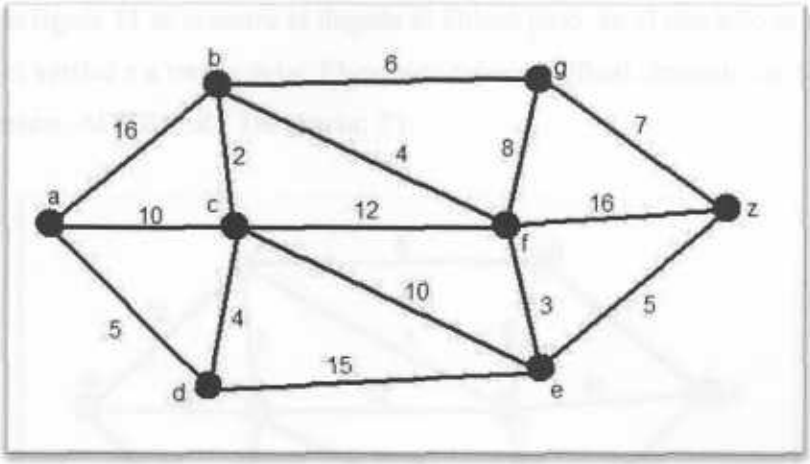


Figura 9. Ejemplo algoritmo de caminos mínimos, grafo inicial.
Fuente: "Enciclopedia Matemáticas Discretas, Teoría de Grafos".

En este primer paso del ejemplo, se puede apreciar que hay tres candidatos: Los vértices b, c y d. Para este caso, hacemos el camino desde el vértice a, hasta el vértice d, ya que es el camino más corto de los tres. **Solución: Camino**: AD - **Distancia**: 5.

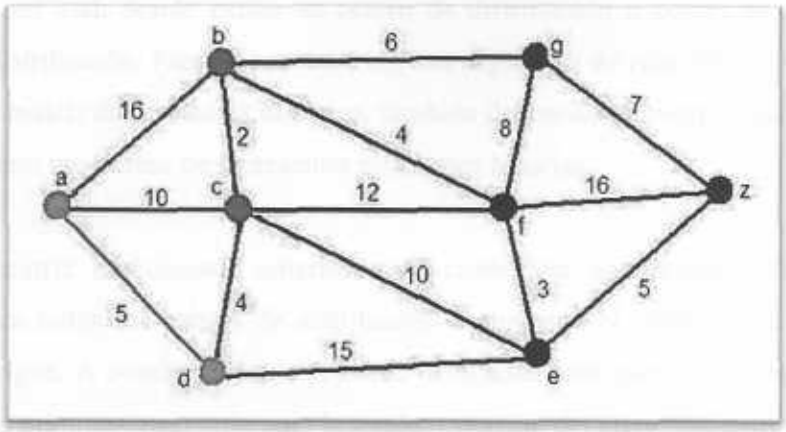


Figura 10. Ejemplo algoritmo de caminos mínimos.
Fuente: "Enciclopedia Matemáticas Discretas, Teoría de Grafos".

En la figura 11 se muestra la llegada al último paso, en el que sólo se añade un candidato, el vértice z a través del e. El camino mínimo y final obtenido es: **Solución Final: Camino**: ADCBFEZ - **Distancia**: 23.

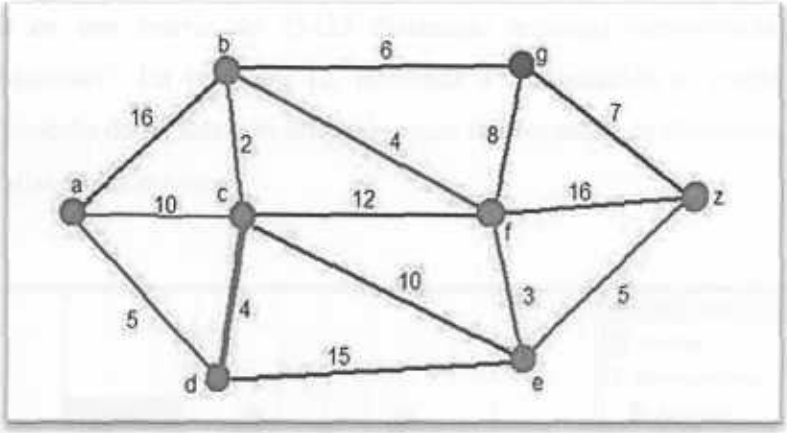


Figura 11. Ejemplo algoritmo de caminos mínimos. Secuencia de Ruta Finalizada. Fuente: "Enciclopedia Matemáticas Discretas, Teoría de Grafos".

VI.1.2. Construcción Matriz de Distancias Mínimas.

El objetivo de la construcción del modelo es, representar gráficamente un sistema de red vial, donde existe un centro de distribución o centro de origen y 25 puntos de distribución. Para la construcción del algoritmo de ruta óptima es necesario generar una matriz de distancias mínimas, también denominada matriz cuadrada, la cual se utiliza como una forma de representar relaciones binarias.

La matriz mencionada anteriormente contempla una relación de distancias mínimas para todos los puntos de distribución incluyendo el centro de distribución o centro de origen. A continuación se presenta detalladamente cómo fue creada la matriz de distancias mínimas, necesaria para la implementación del algoritmo de ruta óptima.

En la construcción del Algoritmo de Ruta Óptima, fue necesario el uso de un modelo de Simulación básico y sencillo para la obtención de una Matriz de Distancias Mínimas, matriz que contiene la distancia más corta a todos los centros de distribución. El Modelo de Simulación utilizado para encontrar la matriz, denominado "Recorrido Mínimo", tiene como principal objetivo, obtener la distancia mínima a todos los puntos

de distribución, incluyendo el centro de distribución o punto de salida. El modelo solamente mantiene una entidad de transporte que realizará el recorrido de ruta óptima nodo a nodo tomando en cuenta todos los puntos de distribución activos y el centro de distribución de la ciudad virtual, arrojando un total de 650 distancias, que serán almacenadas en una matriz de 25x25 distancias mínimas denominada "Matriz de Distancias Mínimas". En la figura 12, mostrada a continuación se puede observar la interfaz del modelo de simulación utilizado, para la obtención de distancias mínimas de la matriz de distancias mínimas.

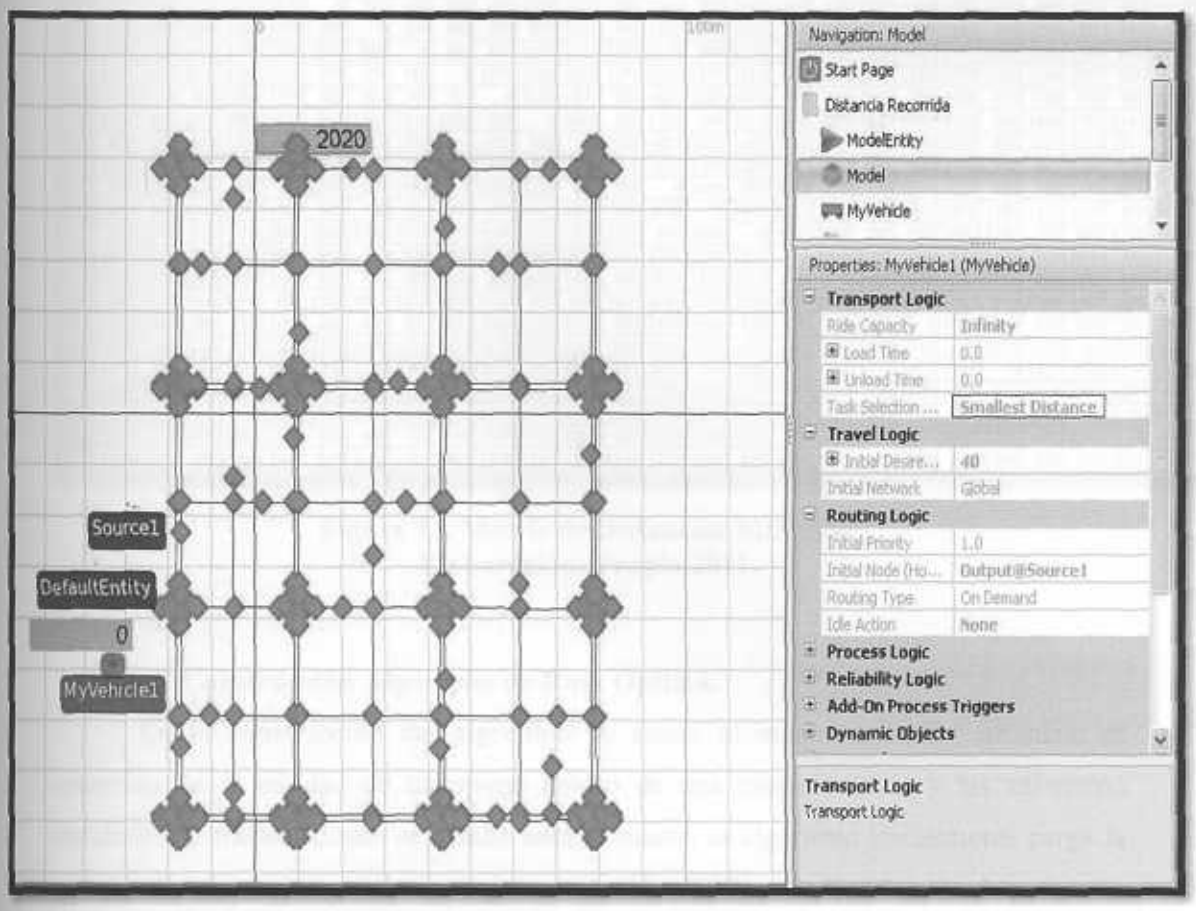


Figura 12. Modelo de simulación recorrido mínimo a los centros de distribución dentro de una ciudad virtual.
Elaboración: Propia 2011.

En la figura 13, se puede obserbar la matriz que contempla la relación de todas las distancias mínimas entre los puntos de distribución incluyendo el centro de distribución o punto de origen, la cual, fueron obtenidas por el modelo de simulación antes descrito.

	CD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CD	0	1480	1000	1150	585	1400	1735	2050	2050	1785	930	150	1170	985	1675	1185	2060	1535	535	1240	1400	935	1150	1440	1625	550
1	1875	0	1470	1965	1580	1030	1120	1185	1185	935	595	1475	775	1800	440	2000	1625	685	1310	1725	2215	795	1525	1870	1230	1365
2	1420	1420	0	1375	1335	400	750	1050	1050	800	1135	1230	695	1225	1200	1410	1075	550	735	1135	1625	950	150	1280	640	790
3	1755	2055	690	0	1680	1035	890	900	900	1435	1770	1575	1330	1570	1835	930	885	1185	1080	435	635	1585	785	250	820	1135
4	955	1570	440	935	0	840	1190	1490	1490	1240	1285	995	1135	770	1640	970	1515	990	500	735	1185	1100	590	880	1080	335
5	2250	1240	1225	1430	2175	0	585	650	650	400	1285	2070	1080	2065	800	1465	1090	150	1575	1190	1680	1375	990	1335	695	1630
6	1705	1260	1190	1630	1630	200	0	850	850	600	975	1525	495	1520	1000	1665	1290	350	1030	1390	1880	790	1190	1535	895	1085
7	2495	1430	1470	1675	2420	1030	830	0	895	645	1475	2315	1325	2310	990	1710	825	1180	1820	1435	1415	1620	1235	1580	940	1875
8	2400	2035	1375	1565	2325	975	775	785	0	1375	1750	2220	1270	2215	1775	1615	440	1125	1725	1160	1030	1565	1140	1485	885	1780
9	1850	1445	825	1030	1775	385	185	745	745	0	1160	1670	680	1665	1185	1065	730	535	1175	790	1280	975	590	935	295	1230
10	1900	850	1385	1880	1825	945	1035	1100	1100	850	0	1680	690	1715	740	1915	1540	600	1225	1640	2130	200	1440	1785	1145	1280
11	950	1165	875	1370	435	1275	1625	1885	1885	1635	880	0	1020	1095	1525	1405	1950	1385	385	1170	1620	985	1025	1315	1515	770
12	1210	1220	695	1190	1095	1040	1390	1650	1650	1400	935	990	0	1025	1290	1225	1715	1150	535	990	1440	750	845	1135	1280	590
13	970	1420	800	950	400	1200	1535	1835	1835	1600	1135	845	985	0	1490	985	1820	1350	350	1040	1200	950	950	1185	1425	350
14	2095	990	1360	1565	1980	920	720	785	785	535	1035	1875	885	1910	0	1600	1225	795	1420	1325	1815	1180	1125	1470	830	1475
15	825	2020	600	750	1040	1000	1335	1635	1635	1400	1735	975	1295	640	1800	0	1620	1150	990	840	1000	1550	750	985	1225	990
16	1960	1970	935	1125	1845	950	790	800	800	1350	1685	1740	1245	1775	1750	1175	0	1100	1285	720	590	1500	700	1045	735	1340
17	2100	1585	1075	1280	1985	635	435	500	500	250	1410	1880	930	1915	1145	1315	940	0	1425	1040	1530	1225	840	1185	545	1480
18	895	1110	1040	1495	600	1260	1610	1870	1870	1620	825	495	1005	1040	1510	1530	1935	1370	0	1335	1745	970	1190	1480	1500	895
19	1610	1620	585	790	1495	600	495	835	835	1000	1335	1390	895	1425	1400	825	820	750	935	0	1040	1150	350	695	385	990
20	1450	2590	1225	535	1665	1570	1425	1435	1435	1970	2305	1600	1865	1265	2370	625	1420	1720	1615	970	0	2120	1320	785	1355	1615
21	1975	650	1570	2065	1680	1130	1220	1285	1285	1035	695	1575	875	1900	540	2100	1725	785	1410	1825	2315	0	1625	1970	1330	1465
22	1260	1270	745	1240	1145	1090	1440	1700	1700	1456	985	1040	835	1075	1340	1275	1765	1200	585	1040	1490	800	0	1185	1330	640
23	1835	2355	990	920	1980	1335	1190	1200	1200	1735	2070	1875	1630	1650	2135	1010	1185	1485	1380	735	385	1885	1085	0	1120	1435
24	2105	1700	1080	1285	1990	640	440	450	450	1040	1415	1885	935	1920	1440	1320	435	790	1430	1045	1025	1230	845	1190	0	1485
25	1460	1870	450	600	1440	850	1185	1485	1485	1250	1585	1335	1145	1275	1650	635	1470	1000	840	690	850	1400	600	835	1075	0

Figura 13. Matriz de Distancias Mínimas.
Elaboración: Propia 2011.

VI.1.3. Construcción Algoritmo de Ruta Óptima.

En la construcción del algoritmo de ruteo, el mismo trata de optimizar el recorrido de la entidad de transporte dentro de una ciudad virtual y las existentes entidades de tráfico. Como se detalla anteriormente, el algoritmo inicialmente carga la matriz de distancias mínimas bajo un Archivo.TXT manejado por el programa computacional Java SE, leyendo así todas las distancias mínimas a los centros de distribución existentes, localiza el punto de salida o centro de distribución de origen y comienza una fase de implementación para los centros de distribución que se desean activar.

Aleatoriamente se escogen 15 centros de distribución que se encuentran activos dentro de los 25 existentes, una vez escogidos los nodos que se desean activar se

procede a la obtención de la secuencia de ruta óptima. Con base a los 15 puntos de distribución activos el algoritmo comienza a leer los archivos de la matriz, seleccionando la distancia mínima del centro de origen al nodo más cercano dentro de la ruta establecida inicialmente (el programa computacional arrojará la distancia y el número de nodos activos). Posteriormente se para en el nodo más cercano al origen o "nodo 1" y nuevamente lee los archivos de la matriz, seleccionando la distancia mínima del "nodo 1" al nodo más cercano de los 14 restantes que se encuentran activos, denominando así al "nodo 2". El algoritmo mantiene un ciclo continuo hasta leer los 15 puntos de distribución activos, arrojando finalmente la secuencia de ruta óptima, coordenadas y distancia total recorrida por la entidad de transporte. Con el diseño y construcción del Algoritmo de Ruta Óptima podremos generar una secuencia de ruta, que nos permitirá reducir satisfactoriamente el tiempo de recorrido de la entidad de transporte en la ruta establecida aleatoriamente. En la figura 14 mostrada a continuación, se presenta la interfaz de algoritmo de ruta óptima.

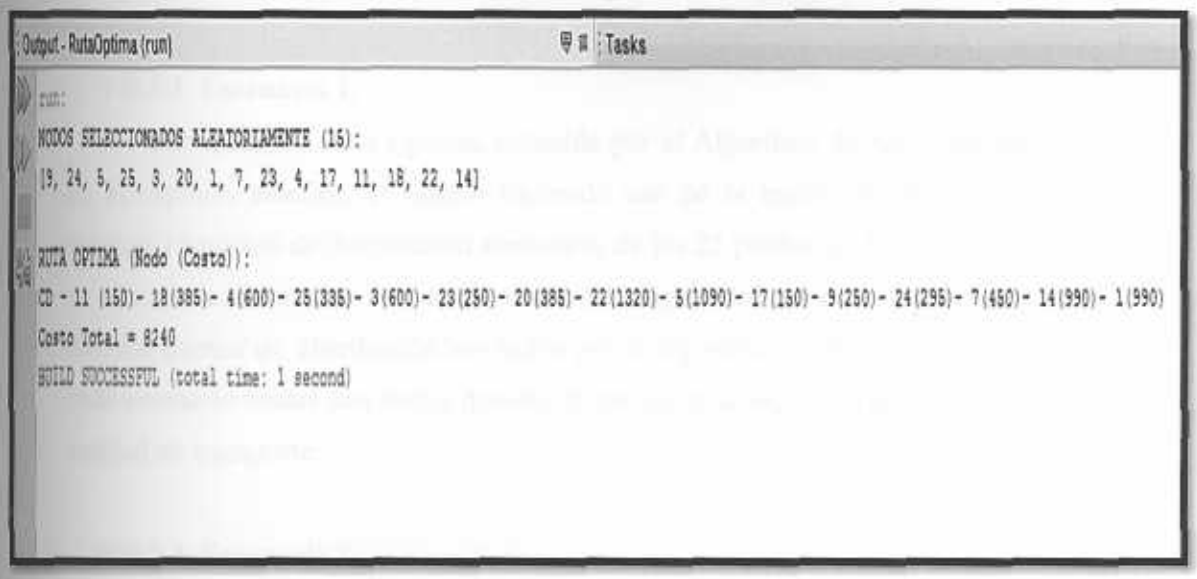


Figura 14. Interfaz Algoritmo de Ruta Óptima.
Elaboración: Propia 2011.

CAPÍTULO VII. DISEÑO DE LOS ESCENARIOS EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES DETERMINADAS

En este capítulo se presenta el diseño de 5 experimentos, donde cada uno de ellos consta de 4 escenarios en función de las variables determinadas anteriormente, haciendo uso del modelo de simulación y el algoritmo de ruteo. Para la construcción de los distintos experimentos se escogen aleatoriamente 15 puntos de distribución activos dentro de la ciudad virtual y posteriormente se analiza en detalle los 4 escenarios que contempla cada uno de los experimentos.

VII. 1. Descripción General.

A continuación se describe los escenarios existentes para casa experimento: Haciendo uso del Algoritmo de Ruteo, se obtendrán aleatoriamente 15 centros de distribución activos, que serán utilizados de igual manera para cada escenario.

VII.1.1. Escenario 1.

Secuencia de Ruta Óptima, obtenida por el Algoritmo de Ruta Optima descrito en el capítulo anterior, el mismo haciendo uso de la matriz de distancias mínimas arrojará 15 puntos de distribución aleatorios, de los 25 puntos de distribución existentes en el sistema. Para cada uno de los escenarios siguientes, se utilizarán exactamente los mismos puntos de distribución arrojados por el algoritmo en la iteración, sin embargo cada escenario tendrá una forma distinta de presentar la secuencia de ruta que seguirá la entidad de transporte.

VII.1.2. Escenario 2.

Secuencia de Ruta Menor-Mayor, obtenida ordenando de menor a mayor los 15 centros de distribución activos, arrojados aleatoriamente por el Algoritmo de Ruta Óptima en la primera iteración del algoritmo.

VII.1.3. Escenario 3.

Secuencia de Ruta Mayor-Menor, obtenida ordenando de mayor a menor los 15 centros de distribución activos, arrojados aleatoriamente por el Algoritmo de Ruta Óptima en la primera iteración del algoritmo.

VII.1.4. Escenario 4.

Secuencia de Ruta Aleatoria, haciendo uso de los 15 puntos de distribución obtenidos inicialmente por el algoritmo de ruteo en la primera iteración, el algoritmo generará una secuencia de ruta óptima para estos 15 puntos de distribución. Obteniendo así la mejor ruta del sistema para los puntos arrojados aleatoriamente.

VII.2. Experimentos Realizados.

Se establecieron 5 experimentos con 4 escenarios distintos para cada uno de los mismos, descritos anteriormente, donde haciendo uso del modelo de simulación podremos obtener el tiempo (Seg) que tarda la entidad de transporte en recorrer la secuencia de ruta establecida, desde el punto de origen a cada nodo o centro de distribución fijo.

VII.2.1. Experimento I.

Para la tabla 5, presentada a continuación se observarán los resultados de cada uno de los escenarios, en la primera iteración del algoritmo para el experimento I.

Los nodos activos, serán los 15 puntos de distribución que serán activados de forma aleatoria por el algoritmo de ruteo en el experimento I.

El escenario 1 contempla la secuencia de ruta óptima arrojada por el algoritmo, haciendo uso de los puntos de distribución aleatorios arrojados inicialmente.

El escenario 2 y 3 representan la organización de los puntos de distribución activos de forma menor-mayor y mayor-menor respectivamente, haciendo uso de los puntos de distribución aleatorios, arrojados inicialmente por el algoritmo de ruteo en la primera iteración.

Para el escenario 4 se hará uso de los puntos de distribución aleatorios arrojados por el algoritmo, según el orden asignado por el mismo en la primera iteración del algoritmo.

Tabla 5. Secuencia de Ruta propuesta para cada uno de los escenarios existentes en el Experimento 1.

Nodos Activos	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
1	11	1	24	1
13	18	2	21	13
4	4	3	20	4
6	2	4	19	6
12	24	6	18	12
24	16	9	16	24
9	20	11	13	9
20	3	12	12	20
21	19	13	11	21
18	6	16	9	18
3	12	18	6	3
19	21	19	4	19
2	1	20	3	2
11	9	21	2	11
16	13	24	1	16

Elaboración: Propia 2011.

En la tabla 6 presentada a continuación, se aprecian los resultados obtenidos por el modelo de simulación, al asignar las diferentes secuencias de ruta establecidas en la tabla anterior (tabla 5): Tiempo de recorrido o tiempo que tarda en recorrer la entidad de transporte, la secuencia de ruta asignada para cada uno de los escenarios existentes y la diferencia recorrida (%), recorrida por la entidad de transporte para cada secuencia de ruta establecida en los escenario 2, 3 y 4 en comparación con el escenario 1, a través de una relación porcentual.

Tabla 6. Tiempo de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), en el Experimento 1.

Descripción Variable de Estudio	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Tiempo de Recorrido (Seg)	780,16	1706,22	1576,05	1526,53
Diferencia Recorrida (%)	0,00	54,28	50,50	48,89

Elaboración: Propia 2011.

VII.2.2. Experimento II

Para la tabla 7, presentada a continuación se observarán los resultados de cada uno de los escenarios, en la segunda iteración del algoritmo para el experimento II.

Los nodos activos, serán los 15 puntos de distribución que serán activados de forma aleatoria por el algoritmo de ruteo en el experimento II.

El escenario 1 contempla la secuencia de ruta óptima arrojada por el algoritmo, haciendo uso de los puntos de distribución aleatorios arrojados inicialmente.

El escenario 2 y 3 representan la organización de los puntos de distribución activos de forma menor-mayor y mayor-menor respectivamente, haciendo uso de los puntos de distribución aleatorios, arrojados inicialmente por el algoritmo de ruteo en la segunda iteración.

Para el escenario 4 se hará uso de los puntos de distribución aleatorios arrojados por el algoritmo, según el orden asignado por el mismo en la segunda iteración del algoritmo.

Tabla 7. Secuencia de Ruta propuesta para cada uno de los escenarios existentes en el Experimento 2.

Nodos Activos	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
19	11	1	25	19
21	18	4	23	21
1	4	8	21	1
15	25	9	19	15
9	15	10	18	9
11	13	11	17	11
13	21	13	15	13
4	14	14	14	4
17	9	15	13	17
25	17	17	11	25
14	8	18	10	14
23	19	19	9	23
10	23	21	8	10
8	10	23	4	8
18	1	25	1	18

Elaboración: Propia 2011.

En la tabla 8 presentada a continuación, se aprecian los resultados obtenidos por el modelo de simulación, al asignar las diferentes secuencias de ruta establecidas en la tabla anterior (tabla 7): Tiempo de recorrido o tiempo que tarda en recorrer la entidad de transporte, la secuencia de ruta asignada para cada uno de los escenarios existentes y la diferencia recorrida (%), recorrida por la entidad de transporte para cada secuencia de ruta establecida en los escenario 2, 3 y 4 en comparación con el escenario 1, a través de una relación porcentual.

Tabla 8. Tiempo de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), en el Experimento 2.

Descripción Variable de Estudio	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Tiempo de Recorrido (Seg)	938,71	1770,06	1630,61	1649,01
Diferencia Recorrida (%)	0,00	46,97	42,43	43,07

Elaboración: Propia 2011.

VII.2.2. Experimento III

Para la tabla 9, presentada a continuación se observarán los resultados de cada uno de los escenarios, en la tercera iteración del algoritmo para el experimento III.

Los nodos activos, serán los 15 puntos de distribución que serán activados de forma aleatoria por el algoritmo de ruteo en el experimento III.

El escenario 1 contempla la secuencia de ruta óptima arrojada por el algoritmo, haciendo uso de los puntos de distribución aleatorios arrojados inicialmente.

El escenario 2 y 3 representan la organización de los puntos de distribución activos de forma menor-mayor y mayor-menor respectivamente, haciendo uso de los puntos de distribución aleatorios, arrojados inicialmente por el algoritmo de ruteo en la tercera iteración.

Para el escenario 4 se hará uso de los puntos de distribución aleatorios arrojados por el algoritmo, según el orden asignado por el mismo en la tercera iteración del algoritmo.

Tabla 9. Secuencia de Ruta propuesta para cada uno de los escenarios existentes en el Experimento 3.

Nodos Activos	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
21	11	1	24	21
6	10	5	22	6
24	21	6	21	24
20	1	7	20	20
10	17	9	19	10
19	9	10	17	19
7	6	11	16	7
16	5	15	15	16
9	7	16	11	9
15	16	17	10	15
5	20	19	9	5
1	15	20	7	1
17	22	21	6	17
22	19	22	5	22
11	24	24	1	11

Elaboración: Propia 2011.

En la tabla 10 presentada a continuación, se aprecian los resultados obtenidos por el modelo de simulación, al asignar las diferentes secuencias de ruta establecidas en la tabla anterior (tabla 9): Tiempo de recorrido o tiempo que tarda en recorrer la entidad de transporte, la secuencia de ruta asignada para cada uno de los escenarios existentes y la diferencia recorrida (%), recorrida por la entidad de transporte para cada secuencia de ruta establecida en los escenario 2, 3 y 4 en comparación con el escenario 1, a través de una relación porcentual.

Tabla 10. Tiempo de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), en el Experimento 3.

Descripción Variable de Estudio	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Tiempo de Recorrido (Seg)	783,92	1569,14	1291,20	1376,53
Diferencia Recorrida (%)	0,00	50,04	39,29	43,05

Elaboración: Propia 2011.

VII.2.2. Experimento IV

Para la tabla 11, presentada a continuación se observarán los resultados de cada uno de los escenarios, en la cuarta iteración del algoritmo para el experimento IV.

Los nodos activos, serán los 15 puntos de distribución que serán activados de forma aleatoria por el algoritmo de ruteo en el experimento IV.

El escenario 1 contempla la secuencia de ruta óptima arrojada por el algoritmo, haciendo uso de los puntos de distribución aleatorios arrojados inicialmente.

El escenario 2 y 3 representan la organización de los puntos de distribución activos de forma menor-mayor y mayor-menor respectivamente, haciendo uso de los puntos de distribución aleatorios, arrojados inicialmente por el algoritmo de ruteo en la cuarta iteración.

Para el escenario 4 se hará uso de los puntos de distribución aleatorios arrojados por el algoritmo, según el asignado por el mismo en la cuarta iteración del algoritmo.

Tabla 11. Secuencia de Ruta propuesta para cada uno de los escenarios existentes en el Experimento 4.

Nodos Activos	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
19	18	1	25	19
24	10	5	24	24
25	21	6	23	25
23	14	7	21	23
5	6	10	20	5
20	5	12	19	20
12	7	13	18	12
14	24	14	14	14
21	12	18	13	21
7	25	19	12	7
13	19	20	10	13
1	23	21	7	1
10	20	23	6	10
6	13	24	5	6
18	1	25	1	18

Elaboración: Propia 2011.

En la tabla 12 presentada a continuación, se aprecian los resultados obtenidos por el modelo de simulación, al asignar las diferentes secuencias de ruta establecidas en la tabla anterior (tabla 11): Tiempo de recorrido o tiempo que tarda en recorrer la entidad de transporte, la secuencia de ruta asignada para cada uno de los escenarios existentes y la diferencia recorrida (%), recorrida por la entidad de transporte para cada secuencia de ruta establecida en los escenario 2, 3 y 4 en comparación con el escenario 1, a través de una relación porcentual.

Tabla 12. Tiempo de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), en el Experimento 4.

Descripción Variable de Estudio	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Tiempo de Recorrido (Seg)	957,92	1573,23	1483,03	1505,55
Diferencia Recorrida (%)	0,00	39,11	35,41	36,37

Elaboración: Propia 2011.

VII.2.2. Experimento V

Para la tabla 7, presentada a continuación se observarán los resultados de cada uno de los escenarios, en la quinta iteración del algoritmo para el experimento V.

Los nodos activos, serán los 15 puntos de distribución que serán activados de forma aleatoria por el algoritmo de ruteo en el experimento V.

El escenario 1 contempla la secuencia de ruta óptima arrojada por el algoritmo, haciendo uso de los puntos de distribución aleatorios arrojados inicialmente.

El escenario 2 y 3 representan la organización de los puntos de distribución activos de forma menor-mayor y mayor-menor respectivamente, haciendo uso de los puntos de distribución aleatorios, arrojados inicialmente por el algoritmo de ruteo en la quinta iteración.

Para el escenario 4 se hará uso de los puntos de distribución aleatorios arrojados por el algoritmo, según el orden asignado por el mismo en la quinta iteración del algoritmo.

Tabla 13. Secuencia de Ruta propuesta para cada uno de los escenarios existentes en el Experimento 5.

Nodos Activos	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
8	18	3	25	8
16	10	5	24	16
25	12	8	23	25
15	25	10	22	15
19	3	12	20	19
23	23	14	19	23
14	20	15	18	14
10	15	16	16	10
12	22	18	15	12
18	19	19	14	18
3	24	20	12	3
5	16	22	10	5
24	8	23	8	24
22	5	24	5	22
20	14	25	3	20

Elaboración: Propia 2011.

En la tabla 14 presentada a continuación, se aprecian los resultados obtenidos por el modelo de simulación, al asignar las diferentes secuencias de ruta establecidas en la tabla anterior (tabla 13): Tiempo de recorrido o tiempo que tarda en recorrer la entidad de transporte, la secuencia de ruta asignada para cada uno de los escenarios existentes y la diferencia recorrida (%), recorrida por la entidad de transporte para cada secuencia de ruta establecida en los escenario 2, 3 y 4 en comparación con el escenario 1, a través de una relación porcentual.

Tabla 14. Tiempo de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), en el Experimento 5.

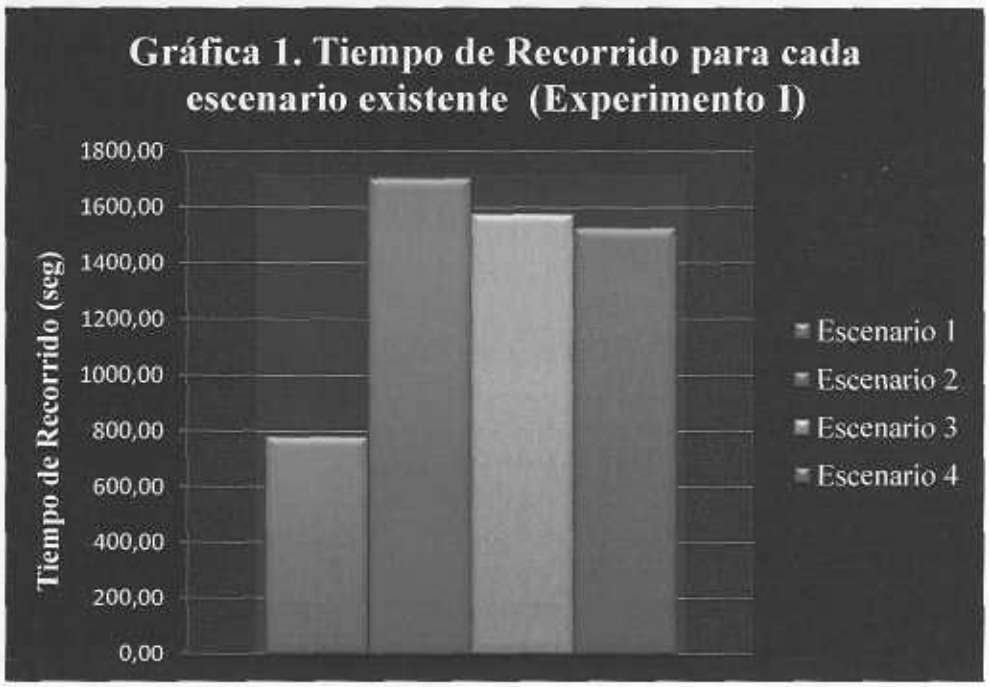
Descripción Variable de Estudio	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Tiempo de Recorrido (Seg)	910,31	1523,13	1455,42	1382,88
Desvío del Recorrido (%)	0,00	40,23	37,45	34,17

Elaboración: Propia 2011.

CAPÍTULO VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

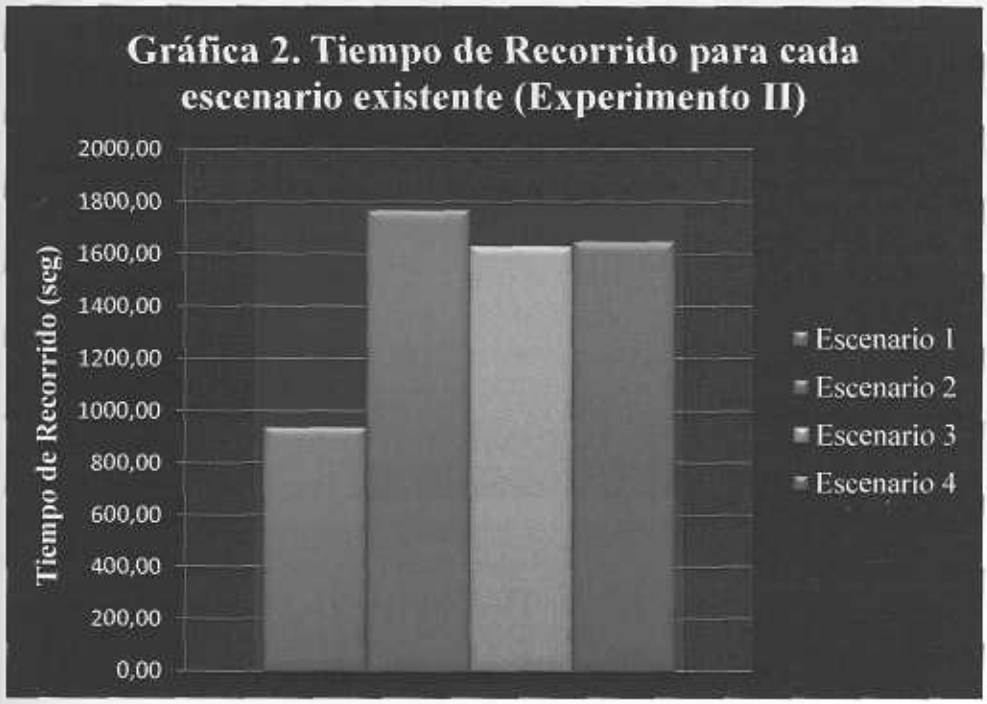
En el presente Trabajo Especial de Grado se realizó un estudio de tiempo recorrido de la entidad de transporte para los diferentes experimentos, compuestos por los 4 escenarios existentes, cada uno con una secuencia de ruta establecida.

En el Primer Experimento "Secuencia de Ruta Óptima", se puede observar en la tabla 5 el tiempo de recorrido para cada escenario y la diferencia recorrida (relación porcentual) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima). Existe una variación significativa en el tiempo de recorrido del escenario 1 en comparación con los escenarios 2, 3 y 4. Para el escenario 1 la entidad de transporte tarda en recorrer, la secuencia de ruta correspondiente al escenario en 780,16seg, el escenario 2 tarda 1706,22seg y mantiene una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario 1 de 54,28%, el escenario 3 tarda 1576,05seg con una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario 1 del 50,50% y finalmente para el escenario 4 tiene un tiempo de recorrido de 1526,53seg y una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario del 48,89%. La comparación de los datos se presenta en el gráfico 1.



Grafica 1. Tiempo de Recorrido para cada escenario existente (Experimento I). Elaboración: Propia 2011.

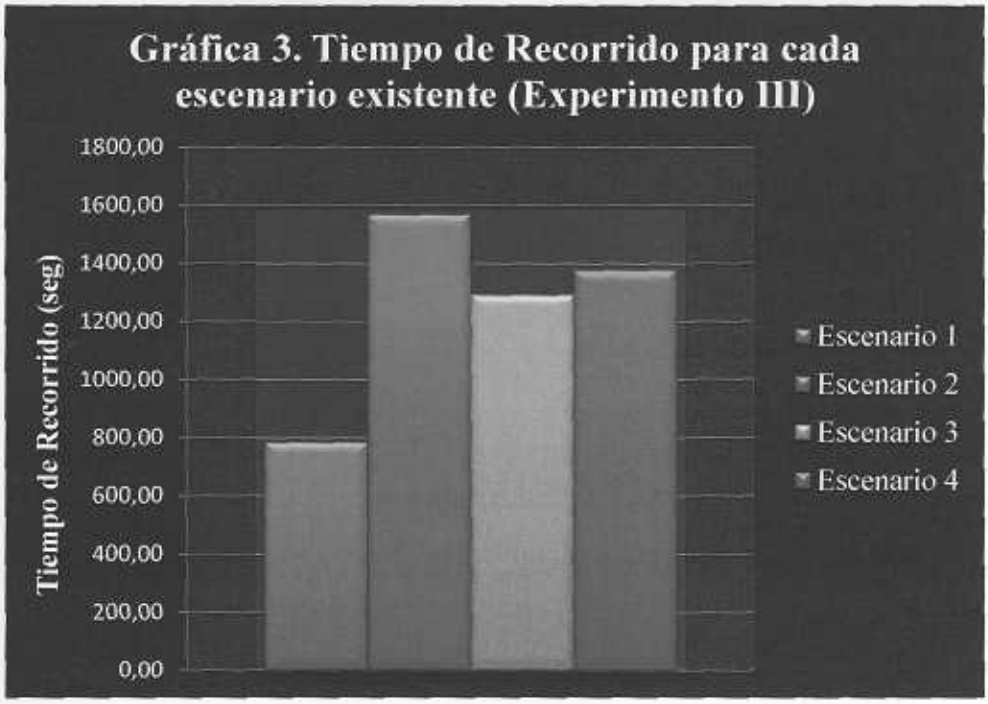
En el Segundo Experimento "Secuencia de Ruta Menor-Mayor", en la tabla 7 el tiempo de recorrido para cada escenario y la diferencia recorrida (relación porcentual) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), se puede observar una notable variación en el tiempo recorrido del escenario 1 en comparación con los escenarios 2, 3 y 4. Para el escenario 1 la entidad de transporte tarda en recorrer, la secuencia de ruta correspondiente al escenario en 938,71seg, el escenario 2 tarda 1770,06seg y mantiene una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario 1 de 46,97%, el escenario 3 tarda 1630,61seg con una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario 1 del 42,43% y finalmente para el escenario 4 tiene un tiempo de recorrido de 1649,01seg y una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario del 43,07%. La comparación de los datos se presenta en el gráfico 2.



Grafica 2. Tiempo de Recorrido para cada escenario existente (Experimento II). Elaboración: Propia 2011.

En el Tercer Experimento "Secuencia de Ruta Mayor-Menor", en la tabla 9 el tiempo de recorrido para cada escenario la diferencia recorrida (relación porcentual) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), se puede observar una

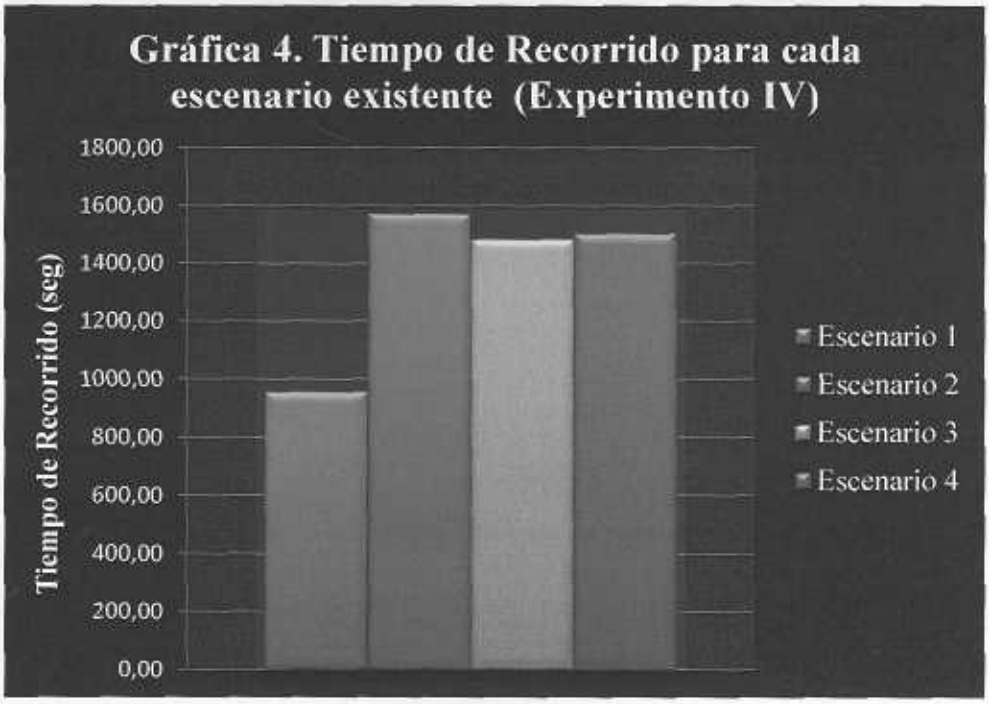
importante variación en el tiempo recorrido del escenario 1 en comparación con los escenarios 2, 3 y 4. Para el escenario 1 la entidad de transporte tarda en recorrer, la secuencia de ruta correspondiente al escenario en 783,92seg, el escenario 2 tarda 1569,14seg y mantiene una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario 1 de 50,04%, el escenario 3 tarda 1291,20seg con una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario 1 del 39,29% y finalmente para el escenario 4 tiene un tiempo de recorrido de 1376,53seg y una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario del 43,05%. La comparación de los datos se presenta en el gráfico 3.



Grafica 3. Tiempo de Recorrido para cada escenario existente (Experimento III). Elaboración: Propia 2011.

En el Cuarto Experimento "Secuencia de Ruta Aleatoria", en la tabla 11 el tiempo de recorrido para cada escenario y la diferencia recorrida (relación porcentual) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), se puede observar una notoria variación en el tiempo recorrido del escenario 1 en comparación con los escenarios 2, 3 y 4. Para el escenario 1 la entidad de transporte tarda en recorrer, la secuencia de ruta correspondiente al escenario en 957,92seg, el escenario 2 tarda 1573,23seg y mantiene una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario 1 de

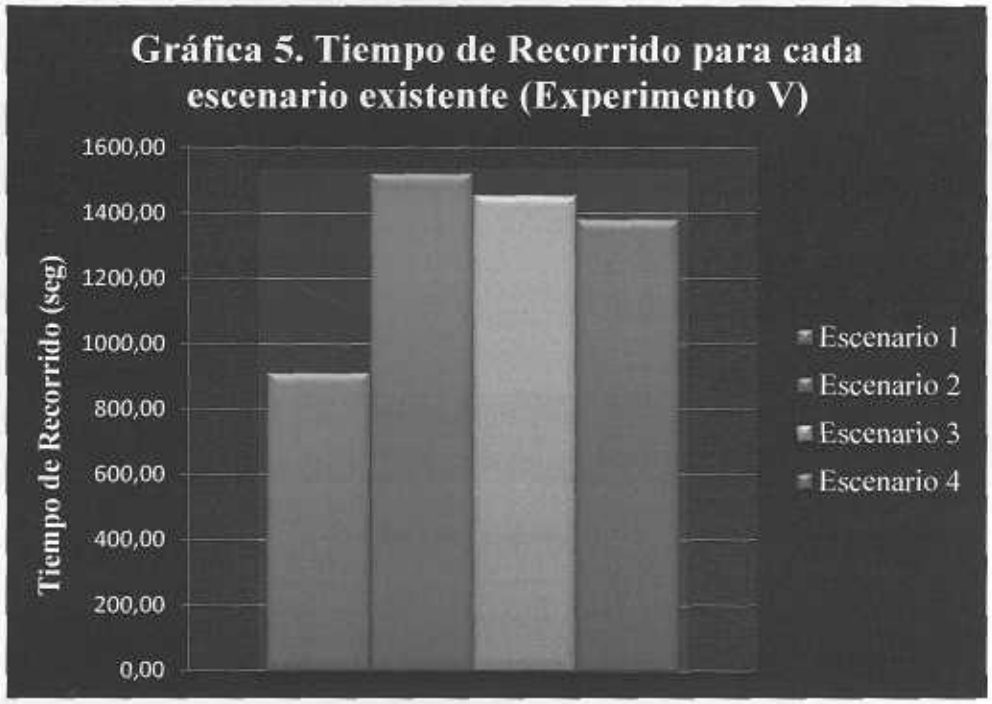
39,11%, el escenario 3 tarda 1483,03seg con una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario 1 del 35,41% y finalmente para el escenario 4 tiene un tiempo de recorrido de 1505,55seg y una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario del 36,37%. La comparación de los datos se presenta en el gráfico 4.



Grafica 4. Tiempo de Recorrido para cada escenario existente (Experimento IV). Elaboración: Propia 2011.

En el Cuarto Experimento "Secuencia de Ruta Aleatoria", en la tabla 13 el tiempo de recorrido para cada escenario y la diferencia recorrida (relación porcentual) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima), De igual manera que en los experimentos anteriores, se puede observar una variación significativa en el tiempo recorrido del escenario 1 en comparación con los escenarios 2, 3 y 4. Para el escenario 1 la entidad de transporte tarda en recorrer, la secuencia de ruta correspondiente al escenario en 910,31seg, el escenario 2 tarda 1523,13seg y mantiene una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario 1 de 40,23%, el escenario 3 tarda 1455,42seg con una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario 1 del 37,45% y finalmente para el escenario 4 tiene un tiempo de recorrido de 1382,88seg y

una diferencia recorrida porcentual respecto al escenario del 34,17%. La comparación de los datos se presenta en el gráfico 4.



Grafica 5. Tiempo de Recorrido para cada escenario existente (Experimento IV). Elaboración: Propia 2011.

Dentro de los 5 experimentos aplicados se presenta de forma notoria, que el tiempo de recorrido es directamente proporcional a los centros de distribución activos que serán seleccionados aleatoriamente, y a la secuencia de ruta establecida en cada uno de los escenarios de estudio existentes. A medida que la secuencia de ruta varía según los puntos de distribución que se encuentras activos, se podrá observar como existen cambios significativos en el tiempo de recorrido para cada escenario, igualmente se verá afectada la diferencia recorrida porcentual de los escenarios 2, 3 y 4 en relación al escenario 1 (Ruta Optima).

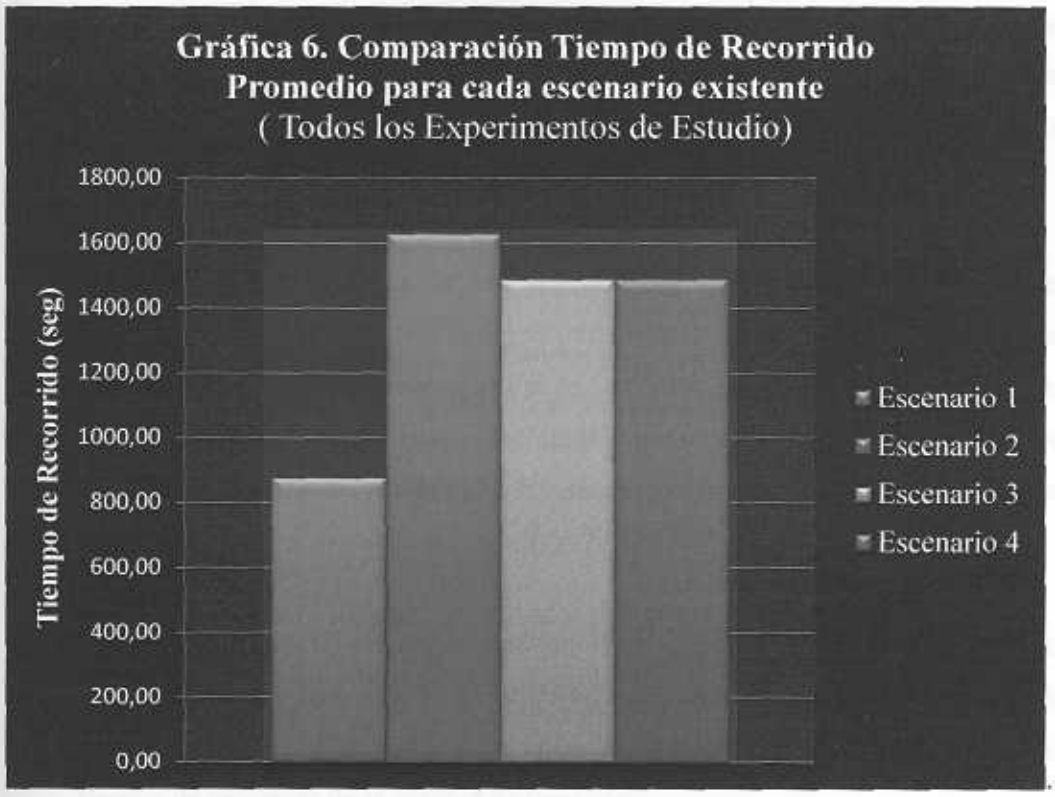
En la tabla 15 a continuación mostrada, se obtuvo un promedio de todos los tiempos recorridos por la entidad de transporte para cada uno de los escenarios, en base a este promedio se procedió al cálculo de la diferencia recorrida porcentual, para los tiempos recorridos de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1, el cual varia en un intervalo del 40 al 50 % arrojando como resultado que la secuencia de Ruta Óptima correspondiente al escenario 1 es la mejor ruta de distribución en el modelo de estudio.

Tabla 15. Comparación en Promedio de los Tiempos de Recorrido para cada escenario y diferencia recorrida (%) de los escenarios 2, 3 y 4 con respecto al escenario 1 (Ruta Óptima).

Descripción	Escenario 1 Tiempo (seg)	Escenario 2 Tiempo (seg)	Escenario 3 Tiempo (seg)	Escenario 4 Tiempo (seg)
Experimento I	780,16	1706,22	1576,05	1526,53
Experimento II	938,71	1770,06	1630,61	1649,01
Experimento III	783,92	1569,14	1291,20	1376,53
Experimento IV	957,92	1573,23	1483,03	1505,55
Experimento V	910,31	1523,13	1455,42	1382,88
Promedio	**874,20**	**1628,36**	**1487,26**	**1488,10**
Diferencia Recorrida (%)	**0,00**	**46,31**	**41,22**	**41,25**

Elaboración: Propia 2011.

La comparación de los datos se presenta en el gráfico 6.



Grafica 6. Comparación Tiempo de Recorrido Promedio para cada escenario existente (Todos los Experimentos de Estudio).
Elaboración: Propia 2011.

CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES

La investigación realizada en el presente Trabajo Especial de Grado dio como resultado las siguientes conclusiones:

- Utilizando el modelo de simulación se logró comprobar que las rutas arrojadas por el algoritmo de ruteo correspondientes al escenario 1, presentan una reducción significativa en el tiempo de recorrido, en comparación con las otras secuencias de rutas existentes. De igual manera se pudo validar el funcionamiento del modelo, añadiendo una entidad de transporte y varias entidades de tráfico, las cuales influyen directamente en el tiempo de recorrido, así como también se comprobó que las lógicas internas del modelo funcionaran correctamente.

- Al ubicar las rotondas en las intersecciones entre calles principales y en las intersecciones de calles principales verticales y calles secundarias con sentido hacia la derecha se logra una mayor fluidez en las calles que poseen mayor volumen de vehículos, evitando ubicar rotondas en intersecciones seguidas.

- Para asignar una secuencia de ruta al modelo de simulación, se hizo uso de un algoritmo de ruta óptima que nos permitió obtener de forma aleatoria diferentes secuencias de ruta, comprobando así de esta manera, que la secuencia de ruta obtenida por el algoritmo disminuye significativa y satisfactoriamente el tiempo de recorrido para la entidad de transporte dentro de la ciudad virtual, en comparación a los restantes escenarios estudiados.

- El tiempo de recorrido de la entidad de transporte se ve afectado por la combinación de nodos activos utilizada, así como por la secuencia de ruta utilizada, ya que la distancia es una de las variables que más influyen en el tiempo de recorrido de la entidad de transporte.

- El volumen de entidades de tráfico utilizado permite congestionar la red lo suficiente como para que se pueda ver una diferencia con respecto a la red sin tráfico, y de esta forma cumplir con los objetivos planteados.

- El sustituir semáforos por rotondas afecta las distancias entre los puntos de distribución de la siguiente forma:

  1. En las intersecciones con rotonda se le da la posibilidad al transporte de utilizar la rotonda para dar "vuelta en U" lo que le evita al transporte darle la vuelta a la cuadra o utilizar una ruta alterna y de esta forma se reduce la distancia recorrida.
  2. Cuando la entidad de transporte desea cruzar en el primer cruce a la derecha, la distancia recorrida disminuye.

  3. Cuando la entidad de transporte desea cruzar en el segundo o tercer cruce a la derecha, la distancia recorrida aumenta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIBROS.

ALONZO S. Lauro A., RODRIGUEZ R. Gabriel J., Carreteras Volumen 8. Editorial UADY. México. 2005. 2da edición.

BANKS, Jerry. Handbook of Simulation. Wiley-IEEE. New York. 1998. 2da edición.

KELTON, W. David, SADWOSKI, Randall P., STURROCK, David T., Simulación con Software Arena. McGraw-Hill Interamericana. México, 2008. 4ta edición.

JOINES, Jeffrey A., ROBERTS, Stephen D., Simulation Modeling with Simio: A Workbook. Simio LLC. Pennsylvania 2010. 1ra edición

KELTON, W. David, SMITH, Jeffrey S., STURROCK, David T., Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications. Learning Solutions, New York 2010. 1ra edición.

BANKS, Jerry, CARSON, John S., NELSON, Barry L., NICOL, David L., Discrete-Event System Simulation. Prentice Hall, New York 2009, 5ta edición.

MORALES S. Hugo A., Ingeniería Vial I. Editorial INTEC, Santo Domingo, República Dominicana. 2006. (210 pág). 3ra edición.

MUÑOZ R. Carlos, Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis. Pearson Educación. 1998. 2da edición.

PLATZMAN, Loren K., BARTHOLDI, Jhon J., Spacefilling curves and the planar travelling salesman problem. Edición School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, 1984. 2da edición.

PUBLICACIONES DIGITALES.

BULL, Alberto. Congestión del tránsito el problema y como enfrentarlo. Chile. 2003. http://www.eclac.org/publicaciones/xml/9/13059/CUE-87.pdf. Publicado por: United Nations Publication.

RUEDA Leonardo J. y RICO, Dewar W., Modelamiento inicial de ciudades de países en vías de desarrollo, utilizando dinámica de sistemas. Colombia. 2007. http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/849/84934071.pdf. Publicado por: Universidad Tecnológica de Pereira.

SANDOYA S. Fernando, Métodos Exactos y Heurísticos para resolver el Problema del Agente Viajero (TSP) y el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP). Ecuador.2007.http://www.icm.espol.edu.ec/jornadas/14/archivos/Diapositivas/Sandoya Fernando/conferencia/SandoyaFernando_M%C3%A9todos_exactos_y_heur%C3%ADsticos_para_el%20VRP_jornadas.pdf Publicado por: Escuela Superior Politécnica Del Litoral.

MANUALES.

Ayuntamiento de Madrid. Instrucción de Vía Pública: Urbanismo y Tránsito. Diciembre 2000.

http://www.carreteros.org/normativa/travesias/pdfs/ccaa_pdf/ivp_ay_madrid.pdf

Ministerio de transporte y comunicaciones del Perú, "Manual de dispositivos de control del tránsito automotor para calles y carreteras" 2000. 2da edición. http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/manual/Transito/css/home.htm

Ministerio de transporte y comunicaciones del Perú, "Manual de diseño geométrico para carreteras" 2001. 2da edición.

http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/manual/DG-2001/css/home.htm

TESIS.

DARDER, G. Víctor. Funciones de las rotondas urbanas y requerimientos urbanísticos de la organización. Universidad Politécnica de Cataluña. Para optar al título de Urbanista. España. Abril-2005. http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/3375

ARMAS, Z. Daniela. 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. Universidad Católica Andrés Bello, para optar al título de Ingeniería Industrial. Venezuela., Caracas Marzo 2011.

DOMINGUEZ, M. Lucrecia. Optimización de las rutas de entrega para una empresa que distribuye productos farmacéuticos en la ciudad de Guatemala. Universidad Francisco Marroquín. Facultad de Ciencias Económicas, para optar al título de Licenciado en economía. Guatemala. Septiembre-1999. www.tesis.ufm.edu.gt/pdf/2803.pdf

GUÍAS.

RAMOS Silvia A. Modelos y Optimización I: Heurísticas y Problemas Combinatorios. 2007. http://materias.fi.uba.ar/7114/Docs/ApunteHeuristicas.pdf

SILVA B. Leopoldo. Algoritmos heurísticos. Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento De Electrónica. Programación en Pascal. Capítulo 25. 07-07-2003. http://www2.elo.utfsm.cl/~lsb/pascal/clases/cap25.pdf

ANEXOS

Anexo1. Procesos Internos del Modelo.

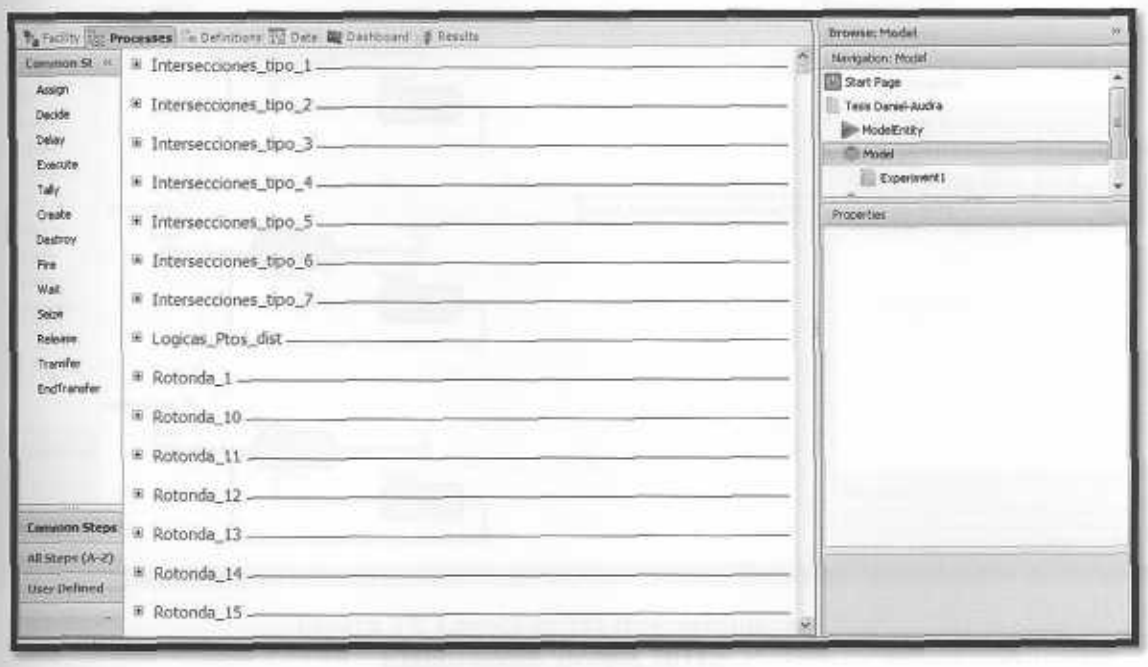


Figura 15. Listado de Procesos en el Modelo, (parte 1 de 2).
Elaboración: Propia 2011.

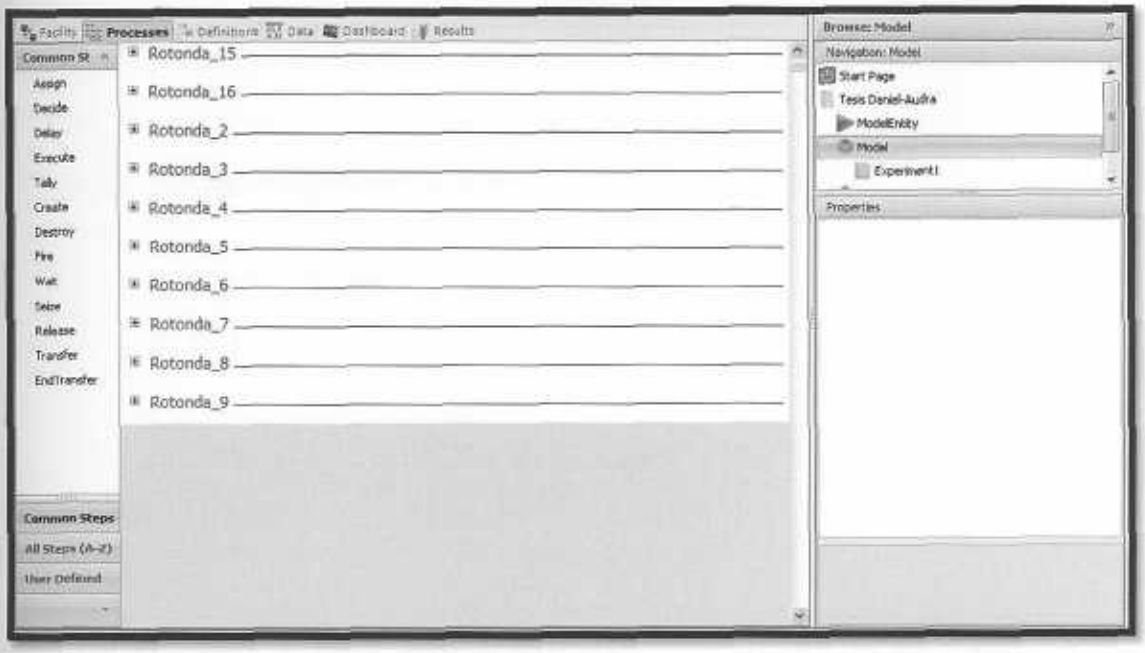


Figura 16. Listado de Procesos en el Modelo, (parte 2 de 2).
Elaboración: Propia 2011.

Anexo 2. Programación de las Intersecciones.

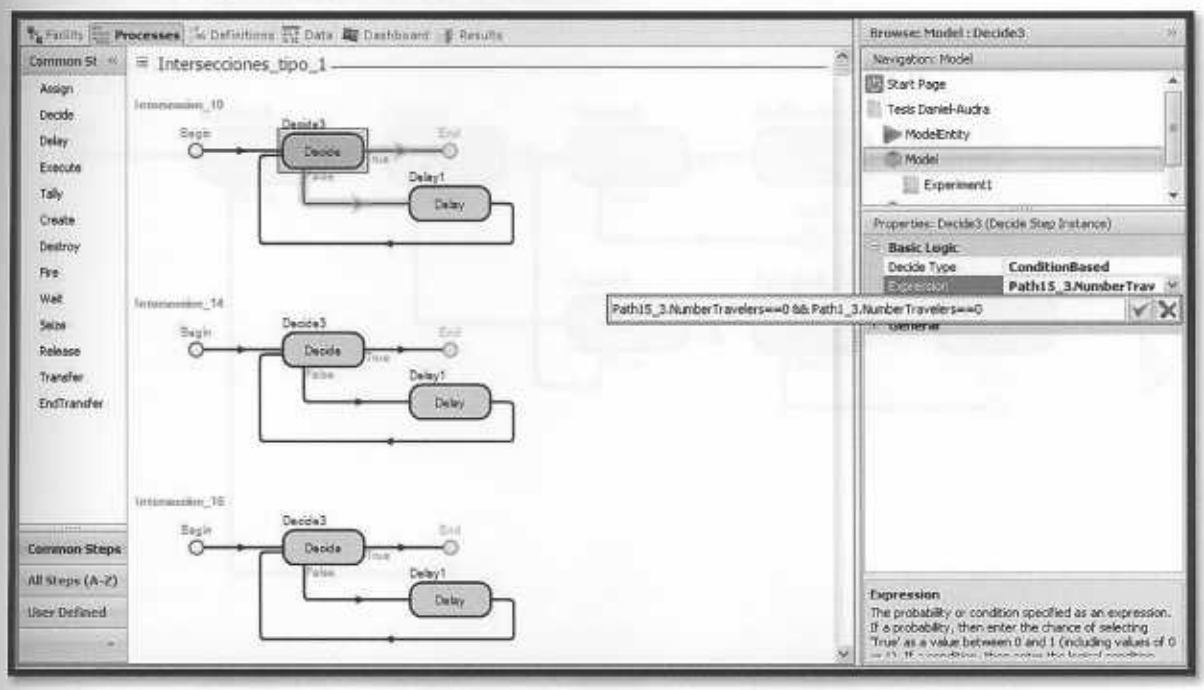


Figura 17. Lógica de las Intersecciones.
Elaboración: Propia 2011.

Anexo 3. Programación de las Rotondas.

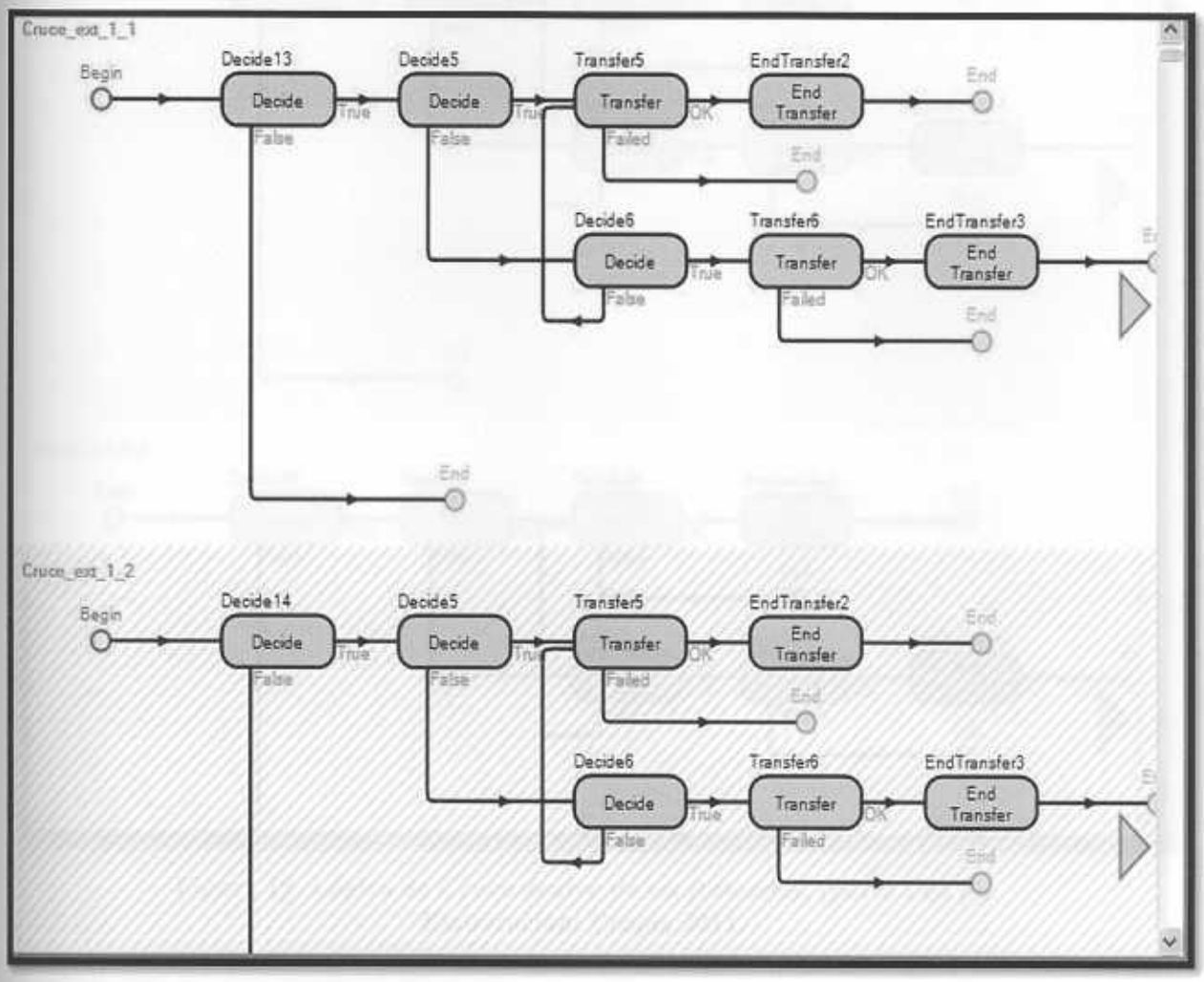


Figura 18. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 1 de 8).
Elaboración: Propia 2011.

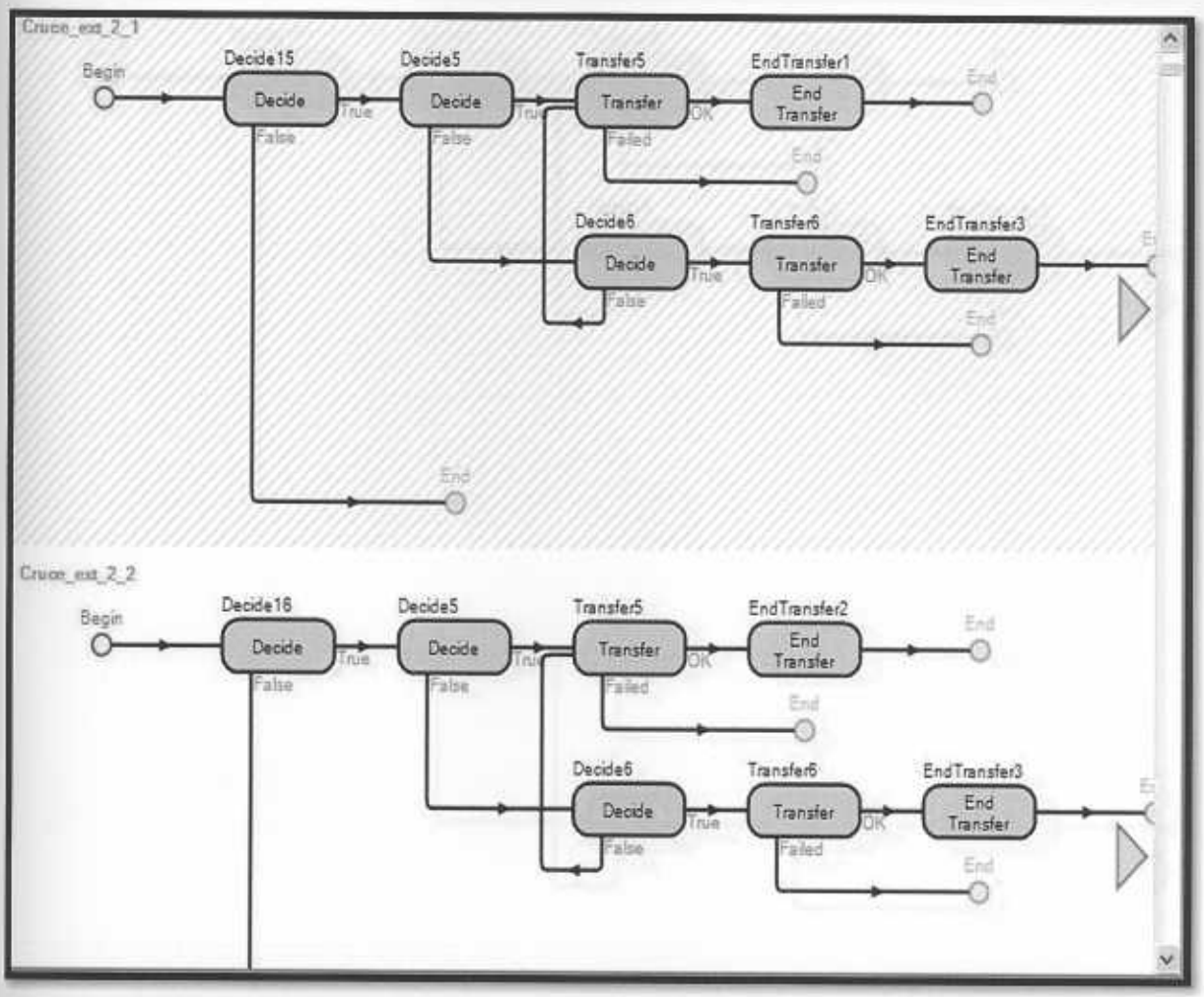


Figura 19. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 2 de 8).
Elaboración: Propia 2011.

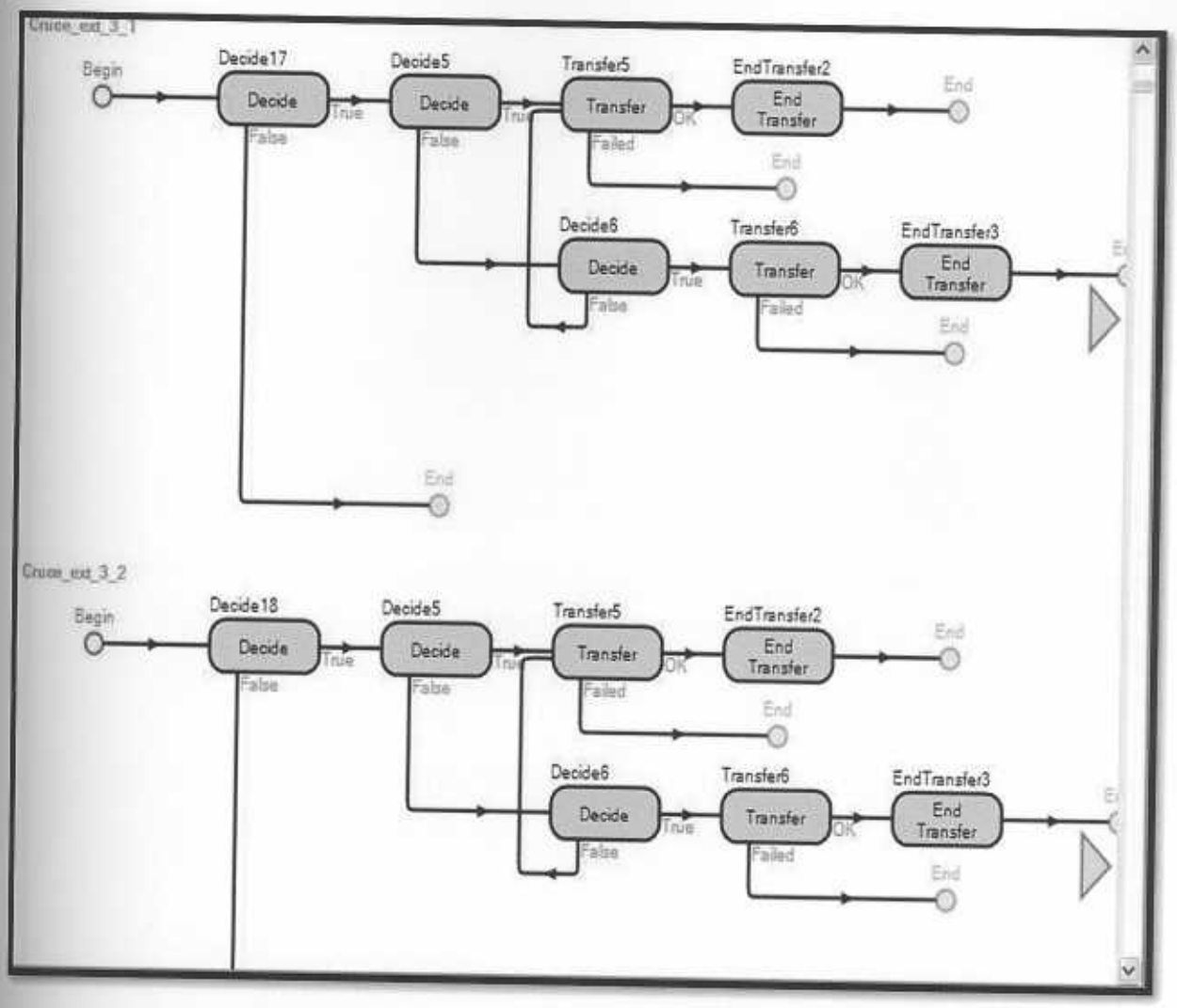


Figura 20. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 3 de 8).
Elaboración: Propia 2011.

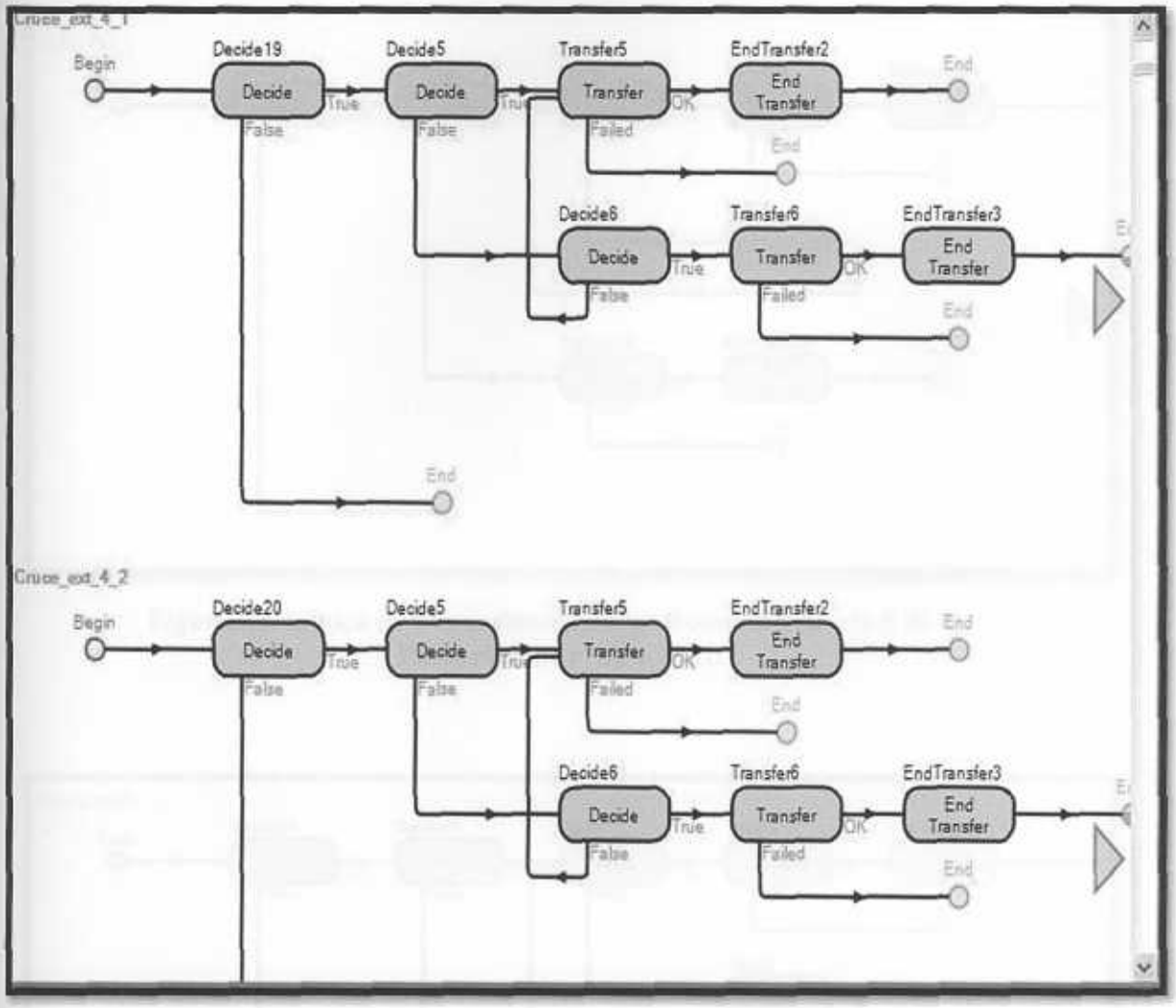


Figura 21. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 4 de 8).
Elaboración: Propia 2011.

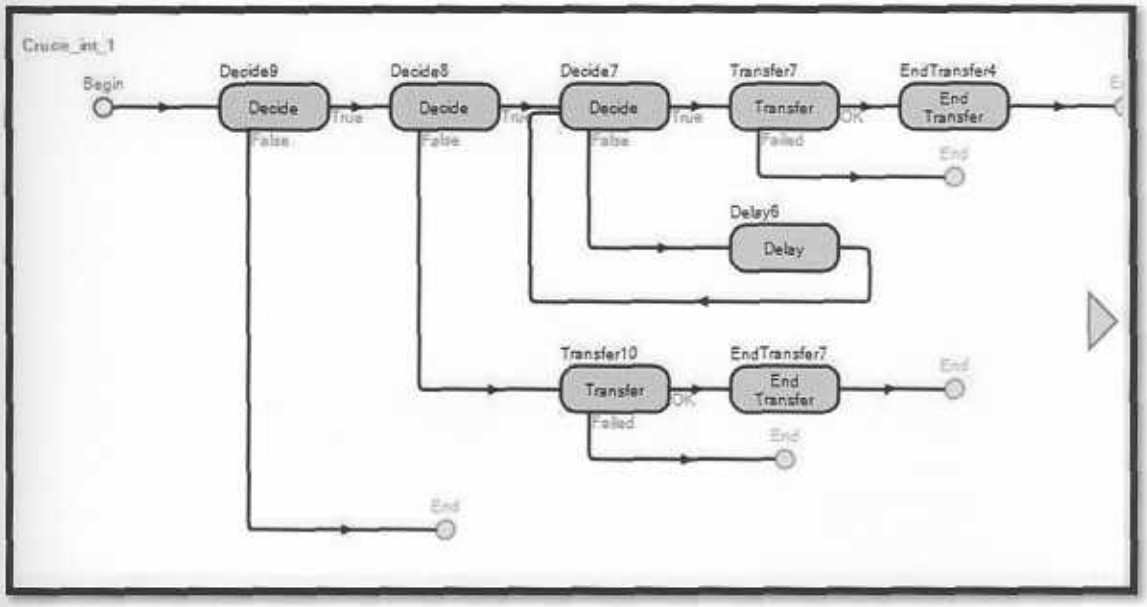


Figura 22. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 5 de 8).
Elaboración: Propia 2011.

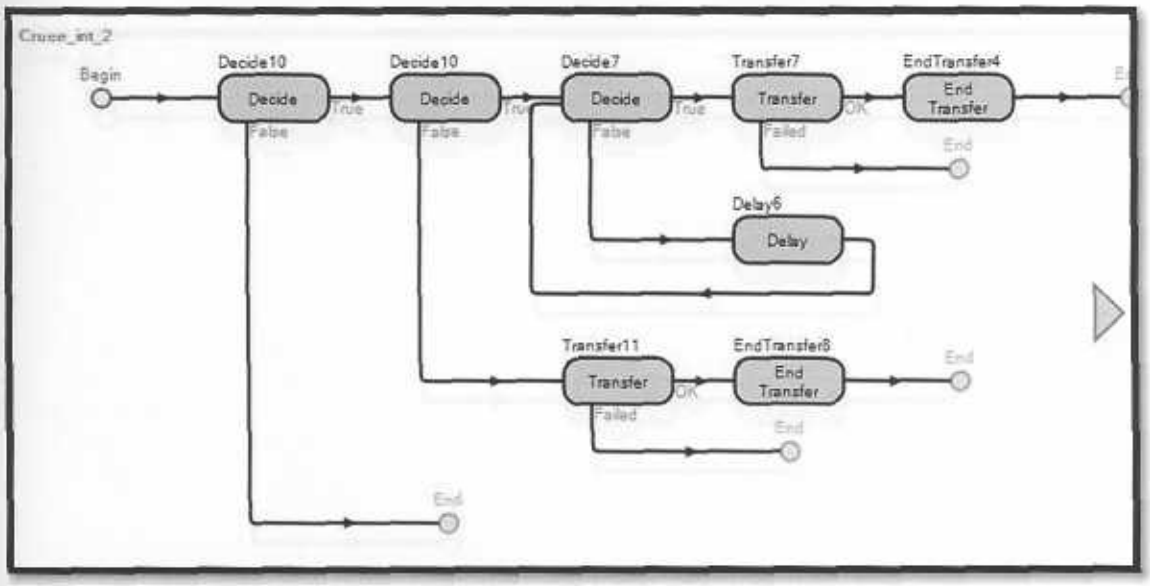


Figura 23. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 6 de 8).
Elaboración: Propia 2011.

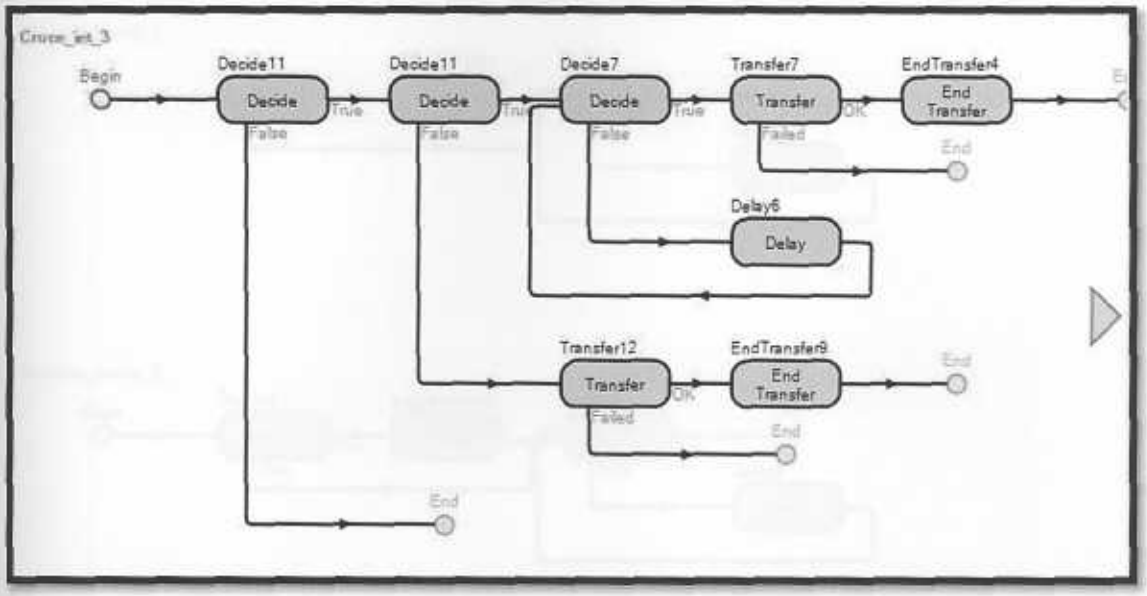


Figura 24. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 7 de 8).
Elaboración: Propia 2011.

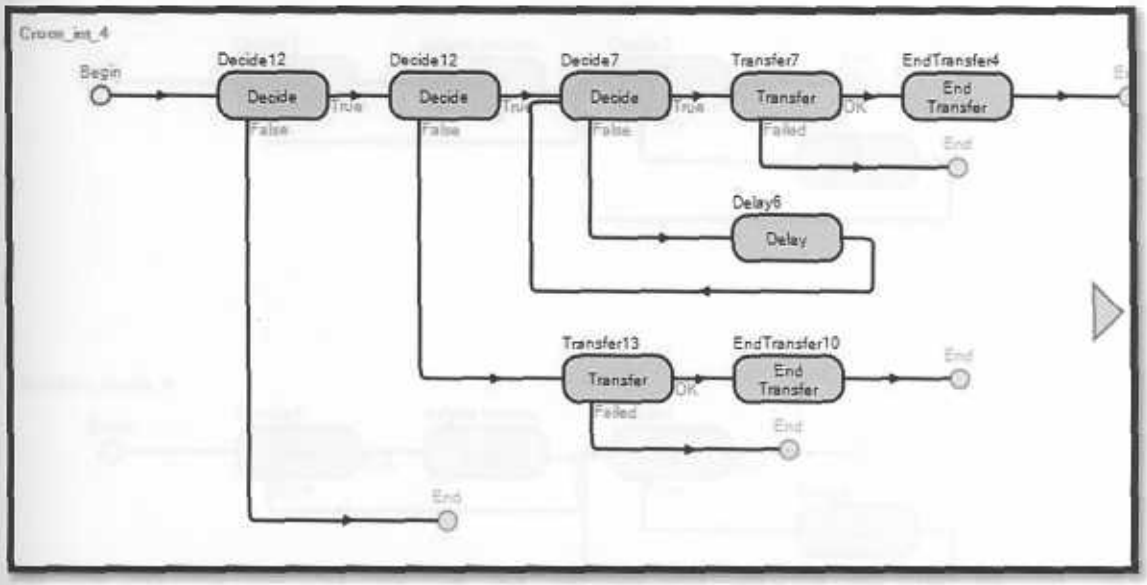


Figura 25. Lógica de Cruce dentro de las Rotondas, (parte 8 de 8).
Elaboración: Propia 2011.

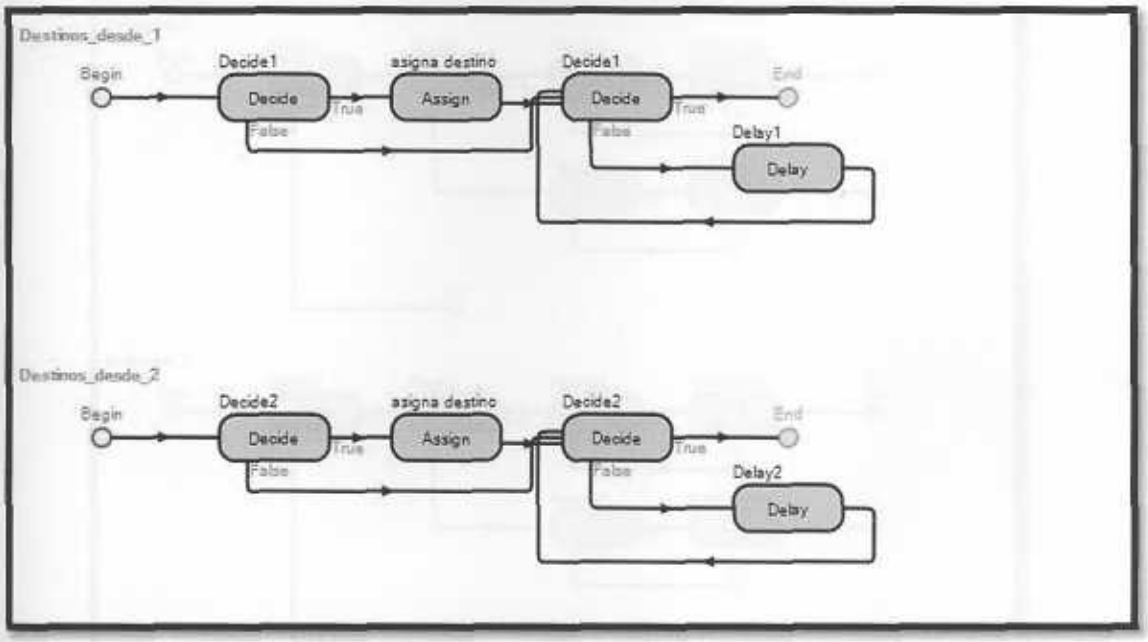


Figura 26. Lógica de Asignación de Destinos, (parte 1 de 2).
Elaboración: Propia 2011.

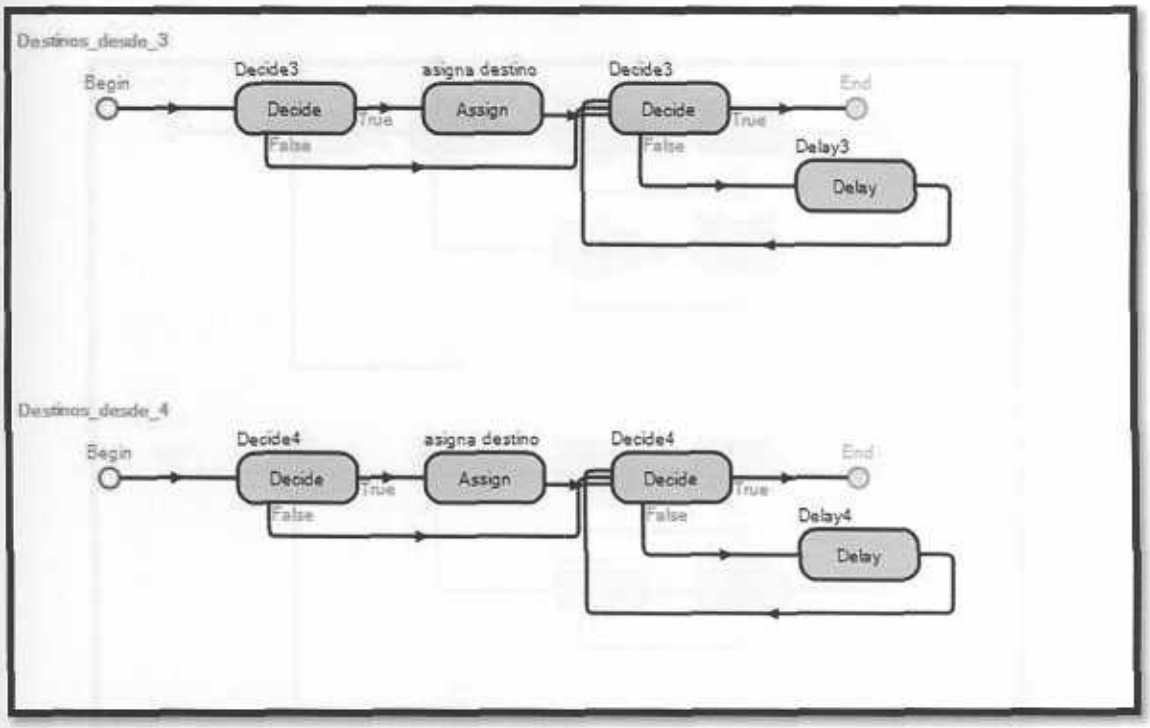


Figura 27. Lógica de Asignación de Destinos, (parte 2 de 2).
Elaboración: Propia 2011.

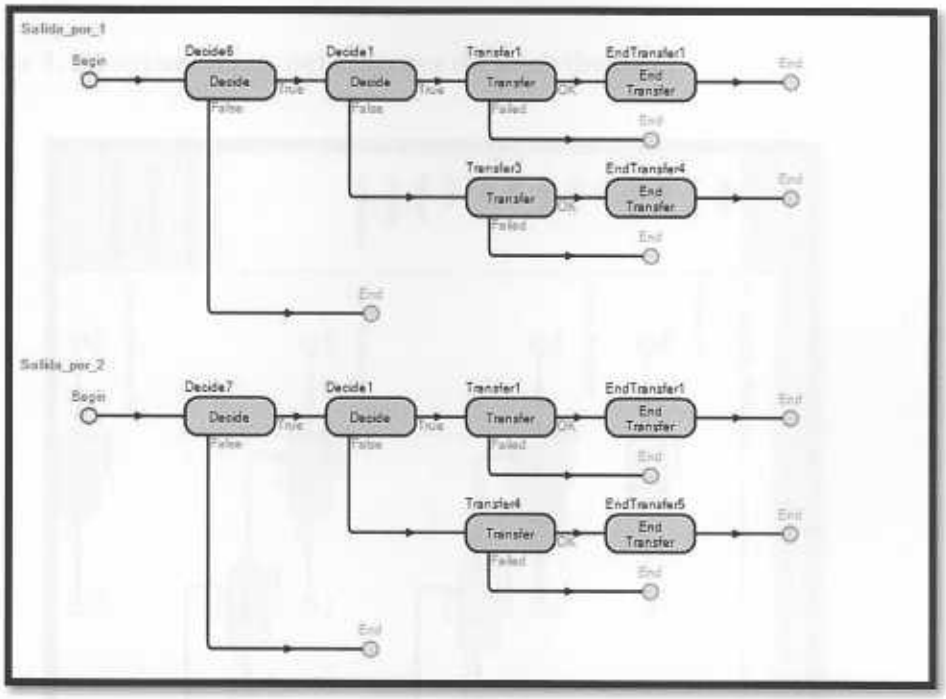


Figura 28. Lógica de salidas de las rotondas, (parte 1 de 2).
Elaboración: Propia 2011.

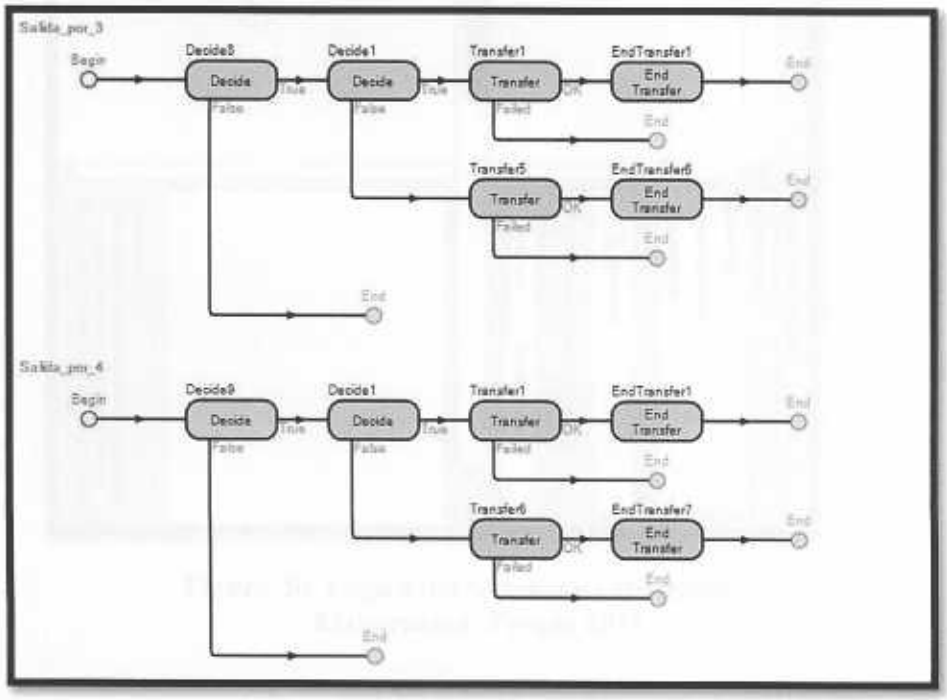


Figura 29. Lógica de Salidas de las Rotondas, (parte 2 de 2).
Elaboración: Propia 2011.

Anexo 4. Programación del Sistema de Distribución.

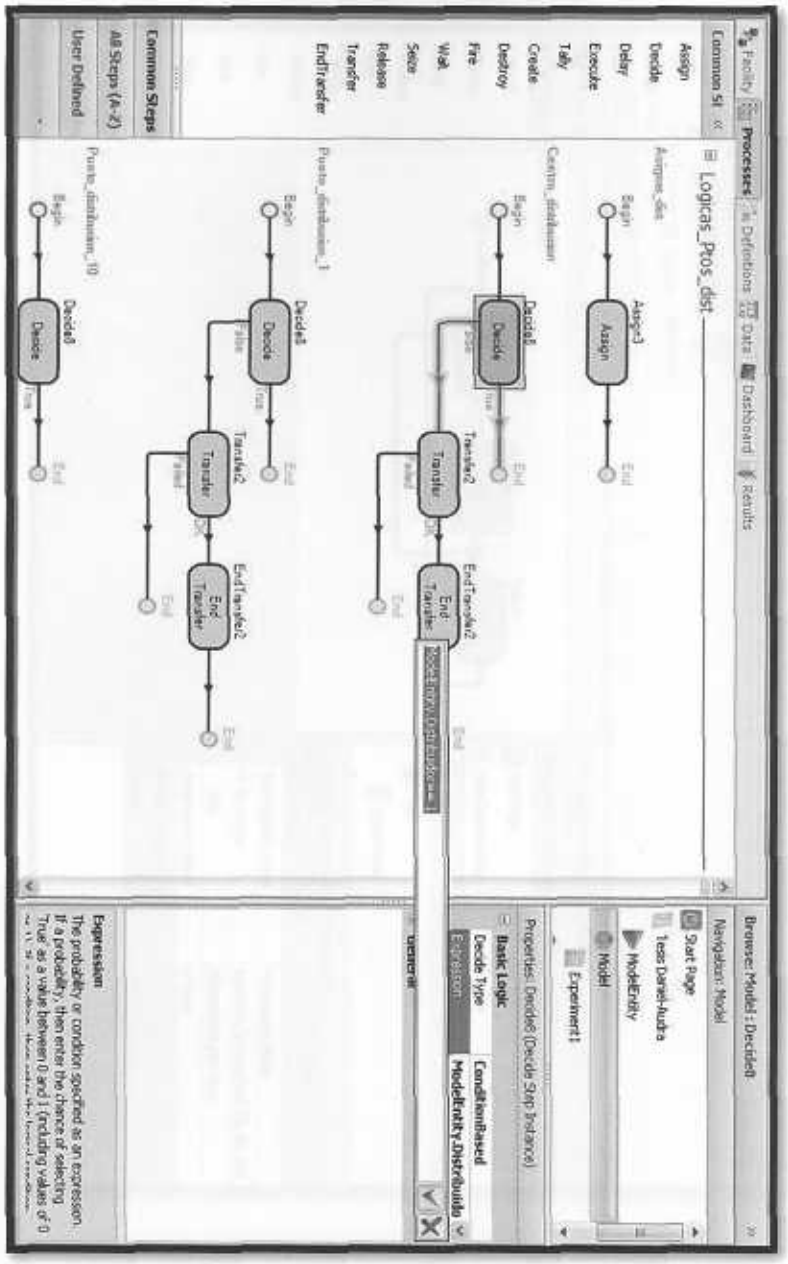


Figura 30. Lógica del Sistema de Distribución.
Elaboración: Propia 2011.

Anexo 5. Proceso Anti-Stuck.

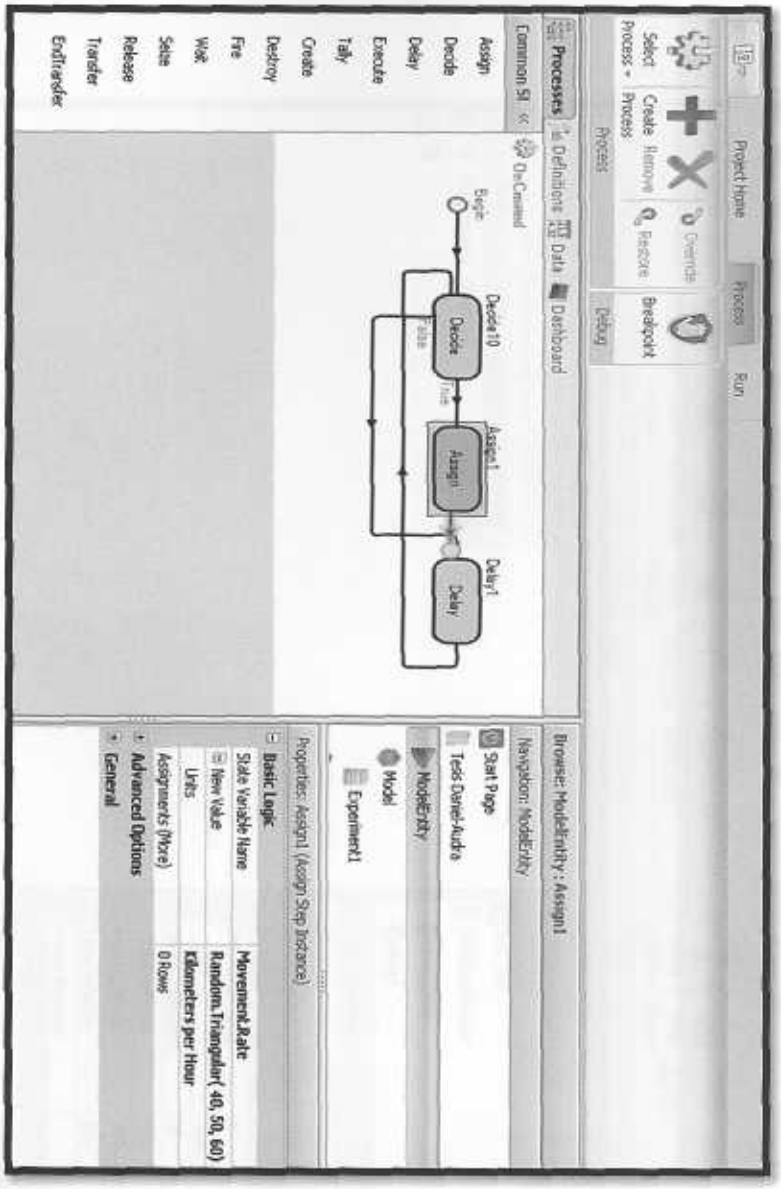


Figura 31. Lógica del Proceso Anti-Stuck.
Elaboración: Propia 2011.

Anexo 6. Resultados Obtenidos para el Experimento 1, Escenario 1.

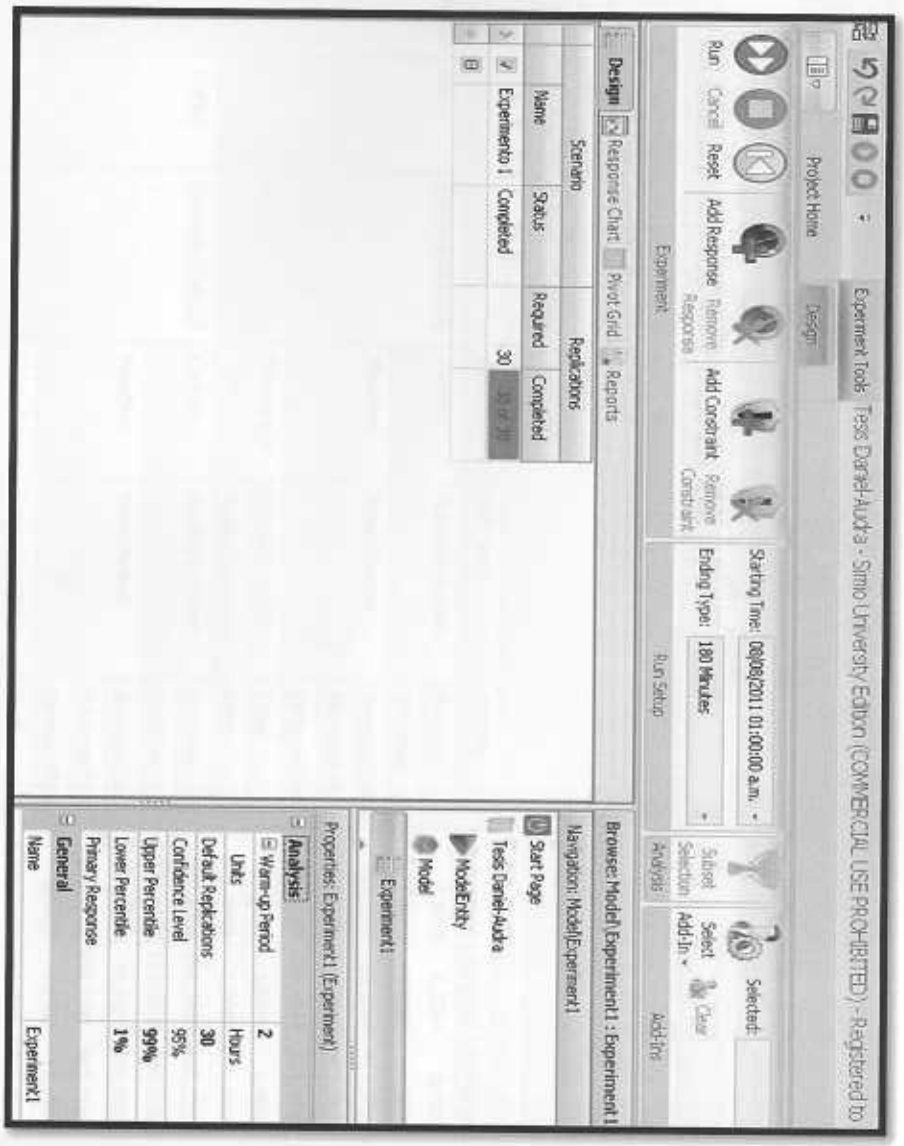
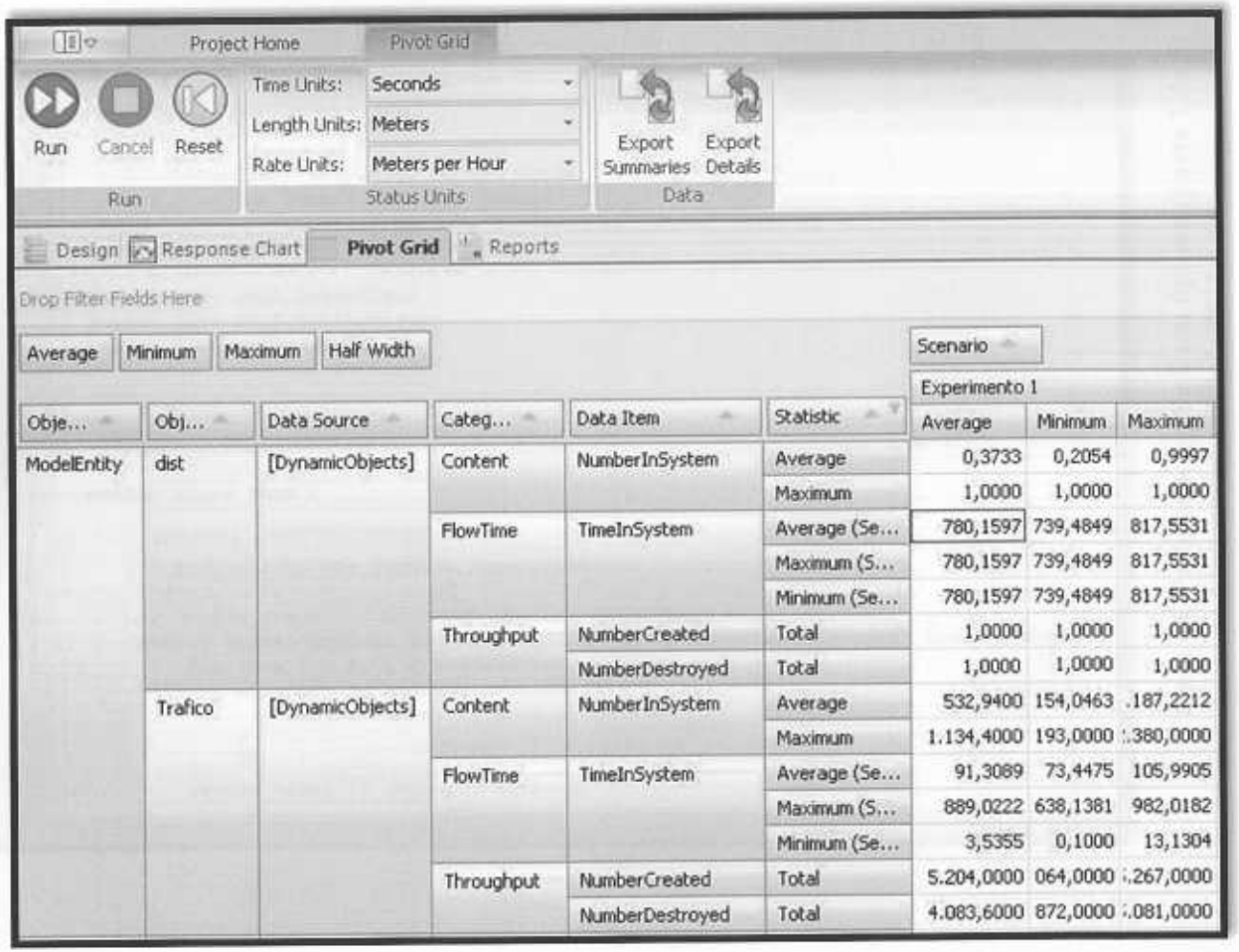


Figura 32. Parámetros del Experimento 1, Escenario 1.
Elaboración: Propia 2011.



Obje...	Obj...	Data Source	Categ...	Data Item	Statistic	Average	Minimum	Maximum
ModelEntity	dist	[DynamicObjects]	Content	NumberInSystem	Average	0,3733	0,2054	0,9997
					Maximum	1,0000	1,0000	1,0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Se...	780,1597	739,4849	817,5531
					Maximum (S...	780,1597	739,4849	817,5531
					Minimum (Se...	780,1597	739,4849	817,5531
			Throughput	NumberCreated	Total	1,0000	1,0000	1,0000
				NumberDestroyed	Total	1,0000	1,0000	1,0000
	Trafico	[DynamicObjects]	Content	NumberInSystem	Average	532,9400	154,0463	.187,2212
					Maximum	1.134,4000	193,0000	:.380,0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Se...	91,3089	73,4475	105,9905
					Maximum (S...	889,0222	638,1381	982,0182
					Minimum (Se...	3,5355	0,1000	13,1304
			Throughput	NumberCreated	Total	5.204,0000	064,0000	:.267,0000
				NumberDestroyed	Total	4.083,6000	872,0000	:.081,0000

Figura 33. Resultados del experimento 1, escenario 1.
Elaboración: Propia 2011.

Anexo 7. Pseudocódigo Algoritmo de Ruta Óptima.

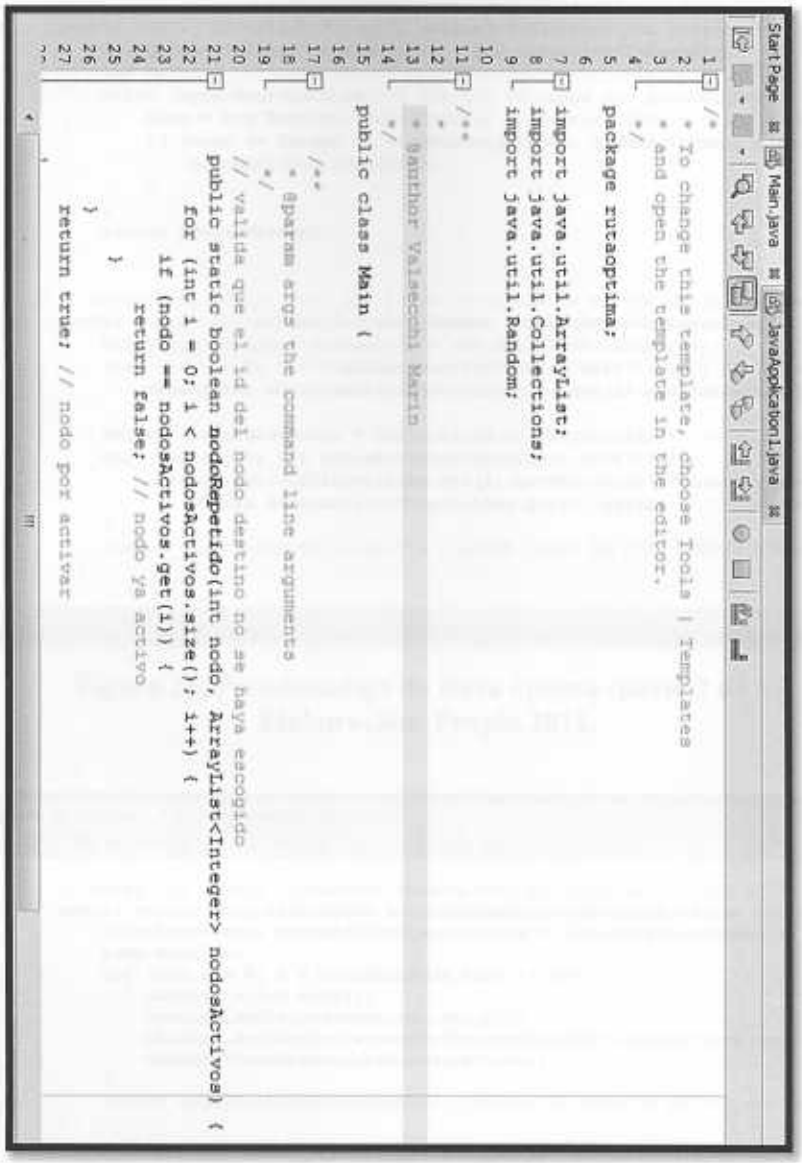


Figura 34. Pseudocódigo de Ruta óptima (parte 1 de 5)
Elaboración: Propia 2011.

```
Start Page | Main.java | JavaApplication1.java

30      // realiza un random de 15 numeros  no repetidos que van desde 0 a 25, mas aba
31      public static ArrayList<Integer> cargarNodosActivos(int origen) {
32          ArrayList<Integer> nodosActivos = new ArrayList<Integer>();
33          int nodo;
34          while (nodosActivos.size() < 15) {// 15 nodos por seleccionar
35              nodo = new Random().nextInt(26); // genera numeros del 0 al 25
36              if (nodo != origen && nodoRepetido(nodo, nodosActivos)) { //distinto a
37                  nodosActivos.add(nodo);
38              }
39          }
40          return nodosActivos;
41      }
42
43      // retorna el id del nodo que posee la distancia minima entre los nodos dispon
44      public static int minimo(ArrayList<nodo> nodosActivosDisponibles){
45          ArrayList<Integer> distancias = new ArrayList<Integer>();
46          for (int i = 0; i < nodosActivosDisponibles.size(); i++) // lo hago para u
47              distancias.add(nodosActivosDisponibles.get(i).getDistancia());
48
49          Object minimaDistancia = Collections.min(distancias);//calcula el minimo d
50          for (int i = 0; i < nodosActivosDisponibles.size(); i++) { // busco quien
51              if(nodosActivosDisponibles.get(i).getDistancia()==Integer.parseInt(min
52                  return nodosActivosDisponibles.get(i).getId();//retorno el id del
53          }
54          return -1;// sino lo encuentra , NUNCA CAERA EN ESTE RETURN PORQUE SIEMPRE
55      }
56
```

Figura 35. Pseudocódigo de Ruta óptima (parte 2 de 5)
Elaboración: Propia 2011.

```
Start Page | Main.java | JavaApplication1.java

56
57      // carga las nuevas distancias dependiendo del nodo selecciona en la ruta como
58      public static ArrayList<nodo> cargarNodosActivosDisponibles(int nodo,int[][] m
59          ArrayList<nodo> nodosActivosDisponibles = new ArrayList<nodo>();
60          nodo nActivo;
61          for (int i = 0; i < nodosActivos.size(); i++) {
62              nActivo = new nodo();
63              nActivo.setId(nodosActivos.get(i));
64              nActivo.setDistancia(matrizDistancia[nodo][nodosActivos.get(i)]);
65              nodosActivosDisponibles.add(nActivo);
66          }
67          return nodosActivosDisponibles;//retorno el nodo de minima distancia
68      }
69
70      //elimina el nodo que fue escogido en la ruta para que no se vuelva a tomar co
71      public static ArrayList<nodo> eliminarNodoEscogido(int id,ArrayList<nodo> nodo
72          for (int i = 0; i < nodosActivosDisponibles.size(); i++) {
73              if(nodosActivosDisponibles.get(i).getId()==id){
74                  nodosActivosDisponibles.remove(i);//elimina el nodo de la lista co
75                  break;
76              }
77          }
78          return nodosActivosDisponibles;
79      }
80
81      public static ArrayList<Integer> calculandoRuta(int[][] matrizDistancia,ArrayL
82          ArrayList<Integer> ruta = new ArrayList<Integer>();
```

Figura 36. Pseudocódigo de Ruta óptima (parte 3 de 5)
Elaboración: Propia 2011.

```
Start Page | Main.java | JavaApplication1.java
80
81      public static ArrayList<Integer> calculandoRuta(int[][] matrizDistancia,ArrayL
82          ArrayList<Integer> ruta = new ArrayList<Integer>();
83          ArrayList<Integer> nodosActivosDisponiblesId;
84          // nodos Activos Disponibles son los nodos que se escogieron aleatoriament
85          // empieza en 0 ya que el CD es el nodo origen
86          ArrayList<nodo> nodosActivosDisponibles = cargarNodosActivosDisponibles(0,
87          // agrega a la ruta el minimo
88          ruta.add(minimo(nodosActivosDisponibles));
89          // elimina el nodo escogido anteriormente por la ruta
90          nodosActivosDisponibles=eliminarNodoEscogido(ruta.get(ruta.size()-1),nodos
91          // se repiten los pasos anteriores hasta recorrer todos los nodos destinos
92          while (nodosActivosDisponibles.size()>0) {
93              nodosActivosDisponiblesId=new ArrayList<Integer>();
94              for (int j = 0; j < nodosActivosDisponibles.size(); j++) //para indica
95                  nodosActivosDisponiblesId.add(nodosActivosDisponibles.get(j).getId
96
97              nodosActivosDisponibles = cargarNodosActivosDisponibles(ruta.get(ruta.
98              ruta.add(minimo(nodosActivosDisponibles));
99              nodosActivosDisponibles=eliminarNodoEscogido(ruta.get(ruta.size()-1),n
100         }
101
102         return ruta;
103     }
104     public static void main(String[] args) {
105         int origen = 0;
106         String url = "C:/Users/Esteban/Desktop/matrizDistancia";
107         ArrayList<Integer> nodosActivos=cargarNodosActivos(origen);
```

Figura 37. Pseudocódigo de Ruta óptima (parte 4 de 5)
Elaboración: Propia 2011.

```
Start Page | Main.java | JavaApplication1.java
103     }
104     public static void main(String[] args) {
105         int origen = 0;
106         String url = "C:/Users/Esteban/Desktop/matrizDistancia";
107         ArrayList<Integer> nodosActivos=cargarNodosActivos(origen);
108         System.out.println("NODOS SELECCIONADOS ALEATORIAMENTE (15):");
109         System.out.println(nodosActivos);
110
111         MatrizDistancia matriz = new MatrizDistancia(url);
112         int[][] matrizDistancia = matriz.matriz; //contiene la matriz distancia
113         System.out.println("");
114
115         System.out.println("RUTA OPTIMA (Nodo (Costo)):");
116         ArrayList<Integer> ruta = calculandoRuta(matrizDistancia,nodosActivos);
117         int acumulador = 0;
118         for (int i = 0; i < ruta.size(); i++) {
119             if(i==0){
120                 System.out.print("CD - "+ruta.get(i)+" ("+matrizDistancia[0][ruta.g
121                 acumulador=acumulador+matrizDistancia[0][ruta.get(i)];
122             }else{
123                 System.out.print("- "+ruta.get(i)+"("+matrizDistancia[ruta.get(i-1)
124                 acumulador=acumulador+matrizDistancia[ruta.get(i-1)][ruta.get(i)];
125             }
126         }
127         System.out.println("");
128         System.out.println("Costo Total = "+acumulador);
129     }
```

Figura 38. Pseudocódigo de Ruta óptima (parte 5 de 5)
Elaboración: Propia 2011.