

SIMULACIÓN DE LA EVALUACION DE LA CALIDAD DEL SERVICIO DE UN
SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO URBANO, BASADA EN
DINAMICA DE SISTEMAS Y AGENTES INTELIGENTES.

MAURO CALLEJAS CUERVO
HELVER AUGUSTO VALERO BUSTOS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
MAESTRIA EN CIENCIAS COMPUTACIONALES
BUCARAMANGA
2008

SIMULACIÓN DE LA EVALUACION DE LA CALIDAD DEL SERVICIO DE UN
SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO URBANO, BASADA EN
DINAMICA DE SISTEMAS Y AGENTES INTELIGENTES.

MAURO CALLEJAS CUERVO
HELVER AUGUSTO VALERO BUSTOS

Presentación de tesis como requisito parcial para optar el título de
Magíster en Ciencias Computacionales

Director de Tesis
CARLOS ARTURO PARRA ORTEGA
Ingeniero de Sistemas
Magíster en Informática

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
MAESTRIA EN CIENCIAS COMPUTACIONALES
BUCARAMANGA
2008

Nota de aceptación:

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento

A las directivas de la Maestría en Ciencias Computacionales de la UNAB - ITESM.

A Carlos Arturo Parra Ortega, director de la tesis

A la Dirección de Investigaciones de la UPTC

Al Grupo de Investigación y Desarrollo en Planeación y Operación del Transporte - GIDPOT de la UPTC.

Al Dr. Domingo Ernesto Dueñas Ruíz, Profesor titular de la Facultad de Ingeniería de la UPTC.

A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron en la realización del presente trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN _____	1
1.MARCO TEÓRICO _____	13
1.1 SISTEMA DE TRANSPORTE _____	13
1.1.1 Transporte público urbano. _____	14
1.1.2 Planeación del transporte público colectivo urbano. _____	16
1.1.3 Calidad del Servicio. _____	19
1.2 MODELADO Y SIMULACIÓN _____	19
1.2.1 Definición de modelado y simulación _____	19
1.2.2 Los pasos en un estudio de simulación. _____	20
1.2.3 Tipos de simulación. _____	22
1.3 DINÁMICA DE SISTEMAS _____	23
1.3.1 Diagramas causales. _____	23
1.3.2 Diagramas de Forrester. _____	24
1.3.3 Proceso de modelado de sistemas. _____	25
1.3.4 Simbología utilizada en dinámica de sistemas para representar diagramas. _____	27
1.3.5 Ecuaciones que generan los modelos basados en dinámica de sistemas. _____	30
1.4. AGENTES _____	30
1.4.1 Definiciones de agente _____	31
1.4.2 Sistemas Multi-Agentes. _____	31
1.4.3 Metodología de simulación con agentes. _____	32
1.4.4 Elementos de una simulación basada en agentes _____	33
1.4.5 UML _____	33
2. ESTADO DEL ARTE _____	35
2.1 TRANSPORTE _____	35
2.1.1 Simulación de modelos de transporte. _____	35
2.1.2. Aplicaciones informáticas para la planificación del transporte. _____	35
2.2 SIMULACION _____	38
2.2.1 Trabajos relacionados con la simulación. _____	38
2.2.2 Software de simulación para dinámica de sistemas. _____	39
2.2.3 Software de modelado y simulación multiparadigma. _____	40
3. METODO DE INVESTIGACIÓN _____	41
3.1 ENFOQUE METODOLÓGICO _____	41
3.1.1 Forma de Investigación. _____	41
3.1.2 Tipo de Investigación. _____	41
3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE UN SISTEMA TPCU. _____	41
3.3 ENTIDADES ASOCIADAS AL SISTEMA TPCU. _____	43

3.4 UNIVERSO DE APLICACIÓN DEL SIMULADOR	45
3.5 UNIDAD DE ANÁLISIS	46
3.6 ELABORACIÓN, SELECCIÓN Y DESARROLLO DE INSTRUMENTOS	46
3.7 VALIDEZ	47
3.8 CONFIABILIDAD	47
3.9 APOYOS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	47
3.10 HIPÓTESIS PLANTEADAS.	47
3.11 PLAN DE PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.	48
4. RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN	49
4.1 DETERMINACIONES PRELIMINARES PARA LA SIMULACIÓN DE LOS MODELOS.	49
4.1.1 Interacción de los modelos macroscópico y microscópico	49
4.1.2 Herramienta de implementación de modelos	50
4.1.3 Persistencia de los datos	50
4.1.4 Escenario real extraído de la información del grupo GIDPOT	51
4.2. SIMULACION DE MODELOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SERVICIO DE UN SISTEMA TPCU	53
4.2.1 Simulación Microscópica.	53
4.2.2 Simulación Macroscópica.	69
4.3 USO DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN.	80
4.3.1 Instalación y ejecución.	80
4.3.2 Manual del simulador con agentes.	80
4.3.3 Manual del simulador con dinámica de sistemas.	80
5. CONCLUSIONES	81
6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	83
REFERENCIAS	84

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Diferencias en la utilización de modelos de simulación_____	32
Tabla 2. Información almacenada en tablas de DBASE_____	50
Tabla 3. Ponderaciones tomadas por el grupo GIDPOT_____	52
Tabla 4. Equivalencia de medidas cualitativas y cuantitativas_____	52
Tabla 5. Escenario real, tomando parámetros de encuestas elaboradas por el Grupo GIDPOT_____	55
Tabla 6. Distancia entre paraderos de la ruta Reten Sur – Muiscas_____	65
Tabla 7. Distribución de la generación y atracción de viajes_____	66
Tabla 8. Escenario de simulación base (datos reales)_____	67
Tabla 9. Escenarios y distribuciones de tiempo_____	67
Tabla 10. Resultados de las diferentes ejecuciones del modelo_____	68
Tabla 11. Resultados de la simulación con el modelo basado en agentes_____	68
Tabla 12. Rangos de calificación cuantitativa y cualitativa del nivel de servicio_____	71
Tabla 13. Formalización del sistema TPCU_____	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Esquema de Manheim_____	13
Figura 2. Pasos en un estudio de simulación, según Banks_____	21
Figura 3. Fases para construir un modelo en dinámica de sistemas_____	27
Figura 4. Ejemplo de diagramas causales_____	28
Figura 5. Ejemplo diagramas causales de realimentación positiva y negativa_____	28
Figura 6. Simbología diagramas de Forrester_____	29
Figura 7. Ejemplo diagramas de Forrester_____	30
Figura 8. Modelo Bottom up para agentes_____	33
Figura 9. Estructura de la plataforma Swarm_____	33
Figura 10. Esquema de interacción entre modelos micro y macroscópico_____	50
Figura 11. Estructura de Swarm y estructura propuesta_____	55
Figura 12. Diagrama de caso de contexto para el sistema TPCU_____	56
Figura 13. Diagrama de estados para un viaje en el sistema TPCU_____	57
Figura 14. Diagrama de estados para despacho en un sistema TPCU_____	57
Figura 15. Diagrama de clases del sistema TPCU_____	58
Figura 16. Diagrama de actividades dentro de un sistema TPCU_____	59
Figura 17. Elementos implementados en el modelo microscópico_____	61
Figura 18. Características de los agentes en AnyLogic_____	62
Figura 19. Diagramas de estado agente viaje_____	63
Figura 20. Diagramas de estado del agente despacho_____	63
Figura 21. Diagramas de estado agente paradero_____	63
Figura 22. Diagramas de estado agente tramo_____	64
Figura 23. Animaciones en AnyLogic_____	64
Figura 24. Interfaz gráfica de usuario del simulador en agentes_____	65
Figura 25. Diagrama de influencias_____	72
Figura 26. Diagramas de Flujo – Nivel en Vensim_____	74
Figura 27. Diagramas de Flujo – Nivel en AnyLogic_____	74
Figura 28. Comportamiento del modelo con la programación real_____	77
Figura 29. Comportamiento del modelo con la programación Alterna_____	78
Figura 30. Comportamiento del modelo con la programación Alterna 1_____	78
Figura 31. Comportamiento del modelo con la programación Alterna 2_____	79
Figura 32. Comportamiento del modelo con la programación Alterna 3_____	79

LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. Mapa de la Ruta Reten Sur – Muiscas, de la Ciudad de Tunja
- Anexo B. Descripción de las características de Anylogic
- Anexo C. Persistencia de los datos
- Anexo D. Instalación y ejecución del software de simulación
- Anexo E. Manual de uso del software de simulación con agentes
- Anexo F. Manual de uso del software de simulación con dinámica de sistemas

LISTA DE SIGLAS

TPCU	Transporte Público Colectivo Urbano
UPTC	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
COLCIENCIAS	Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas"
BID	Banco Interamericano de Desarrollo.
GIDPOT	Grupo de Investigación y Desarrollo en Planeación y Operación del Transporte.
TPM	Transporte Público Masivo.
DS	Dinámica de Sistemas.
IAD	Inteligencia Artificial Distribuida
SMA	Sistemas Multi-Agentes.
BDI	Beliefs, Desires, Intentions.
SIG	Sistema de Información Geográfica
ERP	Enterprise Resource Planning
CRM	Customer Relationship Management
GUI	Graphical User Interface

INTRODUCCIÓN

Los modelos utilizados en la planeación de la operación de los sistemas de Transporte Público Colectivo Urbano (TPCU) de pasajeros en ciudades medianas o intermedias (de menos de 150.000 habitantes) tienen características propias que difieren significativamente de las utilizadas en las grandes ciudades; para el análisis y modelado de dichos sistemas se utilizan técnicas y metodologías relativamente estáticas y solo se puede medir la efectividad de los resultados obtenidos en el modelo, hasta que se lleve a cabo la implantación del mismo, lo que en la práctica resulta muy costoso.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, en el programa de Ingeniería de Transporte y Vías y con la colaboración de COLCIENCIAS-BID, desde 1995 se ha venido trabajando en una investigación sobre la “planeación y operación del transporte de pasajeros en ciudades pequeñas e intermedias, técnicas y métodos”, bajo la responsabilidad de los profesores Daniel Humberto Cárdenas en la parte de planeación y Domingo Ernesto Dueñas en lo correspondiente a la operación, el Grupo de Investigación y Desarrollo en Planeación y Operación del Transporte GIDPOT, está reconocido por COLCIENCIAS y posee categoría B. Los trabajos realizados por el grupo GIDPOT, en cuanto a toma de información y recolección de datos, fueron fuente de información para lo tratado en este trabajo.

La programación de la operación de una ruta o de un conjunto de rutas de TPCU, es un proceso en el cual influye una serie de factores relacionados con la oferta y la demanda que están variando continuamente en el tiempo y en el espacio, por esta razón, se deben realizar ajustes a la programación obtenida en forma continua durante su período de ejecución. Con lo anterior se quiere decir que el proceso de programar la operación no es exacto, sino que está sujeto a incertidumbres, pero el no hacerlo ocasiona serias desventajas en la calidad de la prestación del servicio, que se reflejan en efectos negativos, tanto económicos como sociales.

El proyecto se enmarca en las necesidades y requerimientos de ciudades intermedias, que poseen un sistema de transporte público colectivo urbano, infraestructura vial, infraestructura vehicular y algún tipo de organización en la forma de prestar el servicio como rutas y horarios establecidos.

La relevancia del trabajo aquí propuesto (análisis operativo del transporte, utilizando técnicas computacionales), está dado por la poca exploración a nivel computacional de la medición de variables de comodidad y rapidez, que indican la calidad del servicio prestado en un sistema TPCU, éstas variables hacen parte de la planeación operativa del sistema de transporte y no de la planeación analítica, pues incluir variables para este último tipo de análisis, conlleva a un estudio más profundo y que tiene que ver con la modificación de aspectos relacionados con la infraestructura vial, infraestructura vehicular y otros que no se podrían cubrir en el presente estudio, además existen muchos trabajos relacionados con el área analítica del transporte.

Por lo anteriormente descrito, el objetivo del presente trabajo se fundamentó en el desarrollo de dos modelos que permitieron simular el comportamiento de la operación de un sistema TPCU en ciudades intermedias, los cuales se basaron en agentes inteligentes y en dinámica de sistemas. Para ello se llevó a cabo: primero, el análisis de un sistema TPCU; segundo, se identificaron los principales agentes y las reglas que regulan su comportamiento; tercero, se determinaron los ciclos de realimentación que se presentan en la operación de un sistema TPCU; cuarto, se construyeron los modelos y quinto se llevaron a cabo los análisis de los resultados obtenidos en este proceso.

La organización de éste documento, presenta en el primer y segundo capítulo, una revisión bibliográfica y el estado del arte; en el tercer capítulo el método de investigación utilizado; en el cuarto capítulo se plasman los resultados de la investigación; en el quinto capítulo se presentan las conclusiones y finalmente en el capítulo sexto, se describen las recomendaciones y trabajos futuros de investigación.

1. MARCO TEÓRICO

Este trabajo de grado está relacionado con tópicos pertenecientes a la ingeniería de transporte, y a las ciencias computacionales, en la primera, se tratan temas que permiten entender el análisis, modelado y simulación de los sistemas de transporte y en la segunda, las técnicas necesarias para el modelado y simulación digital, haciendo uso de agentes y de dinámica de sistemas.

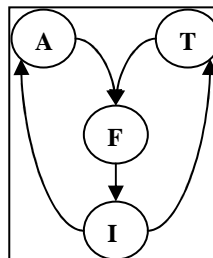
Las definiciones más relevantes sobre los diferentes aspectos relacionados con las áreas a desarrollar en el presente trabajo, se describen a continuación.

1.1 SISTEMA DE TRANSPORTE

Se denomina transporte¹ al traslado de personas o bienes de un lugar a otro. El término proviene del latín trans (al otro lado) y portare (llevar). Un sistema de transporte, tiene numerosos aspectos, la mayoría de los cuales puede discriminarse en infraestructuras, vehículos y operaciones, que interactúan entre sí para la movilización de personas o bienes. Puede también distinguirse según la posesión y uso de la red: transporte público, si los vehículos son utilizables por cualquiera, y transporte privado, si los vehículos solo los usan sus dueños.

La dinámica de un sistema de transporte se puede resumir según Manheim², básicamente en los elementos observados en la Figura 1, con sus transiciones correspondientes.

Figura 1. Esquema de Manheim.



Fuente: Manheim

¹ Wikipedia.org, disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Transporte>, visitado en abril de 2008.

² MANHEIM, M. L. Fundamental of transportation systems analysis: basic concepts. The MIT Press. Cambridge, MA. 1984.

Donde A es el conjunto de actividades de residencia, producción, consumo, recreación, etc., en un área determinada (país, región, ciudad, comuna); T, es el conjunto de vías (red), vehículos, terminales (paraderos y estaciones) y su utilización en esa área; F, es el conjunto de viajes sobre la red entre diversos orígenes y destinos, en diferentes vehículos, por varias rutas y en distintos periodos; e I, es el conjunto de efectos o impactos urbanos y ambientales derivados del tráfico sobre la red: congestión, polución, ruido, segregación, riesgo, intimidación, intrusión visual, inaccesibilidad al transporte público. Cada uno de los elementos anteriormente mencionados se afectan unos a otros, de manera directa o indirecta.

Dependiendo de la magnitud de estos impactos, las personas en forma individual o colectiva (el estado y sus instituciones) toman decisiones. A mediano plazo, estas se manifiestan sobre el sistema de transporte (T); por ejemplo aumento de frecuencias del transporte público, nuevas líneas de metro, aumento de la capacidad vial, entre otras. En un plazo mayor, las decisiones se observarán sobre el sistema de actividades (A); por ejemplo, cambio en el lugar de residencia o trabajo, reubicación de actividades productivas, por mencionar algunas.

El problema que se debe solucionar en el ambiente urbano es la movilización de personas (no vehículos) de manera eficiente, en cuanto al uso de los recursos, principalmente combustible y tiempo de las personas; uso del ambiente (aire, suelo urbano); seguridad (minimizando los accidentes en el tránsito); y equidad social, con igual calidad para todos.

La expresión tangible de los viajes sobre la red (F) es el tránsito o tráfico, entendido como la circulación de las personas por los espacios públicos. En consecuencia, la gestión del tránsito es la administración racional del tráfico en un área urbana determinada.

Es importante hacer notar que el tránsito o tráfico es tan solo el efecto de la dinámica del transporte.

1.1.1 Transporte público urbano. El transporte público urbano está constituido por los medios de transporte en que los pasajeros no son los propietarios de los mismos, siendo servidos por terceros en el sector urbano de una ciudad³. Dentro del transporte público urbano se tiene tres grandes áreas de servicio: el transporte público colectivo urbano, el transporte público masivo y el transporte público individual, la diferencia radica en el volumen de pasajeros que transportan. Estos servicios se describirán con mayor precisión a continuación.

³ Wikipedia.org, disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Transporte_p%C3%ABlico, visitado en abril de 2008.

Las definiciones que se presentan a continuación (TPCU, TPM, TPI) son tomadas en su mayoría del Libro Urbano⁴.

- **Transporte público colectivo urbano TPCU.** El TPCU es el servicio que se proporciona para el transporte de cualquier número de pasajeros que lo deseen, siguiendo rutas y horarios definidos, dentro de ciudades y áreas metropolitanas, fundamentado en el pago de una tarifa. El servicio se presta a través de las vías de la ciudad y está sujeto a la interferencia del resto de tránsito. Este servicio es el más común en ciudades pequeñas e intermedias y es el caso de estudio de este proyecto. En Colombia, el sistema de transporte público colectivo urbano en bus juega un papel importante en el eficiente funcionamiento de la mayoría de las ciudades pequeñas e intermedias, debido a la gran flexibilidad en la prestación de sus servicios con mínimas inversiones en infraestructura vial y porque es el único modo de transporte público que presta servicio en este tipo de ciudades. El sistema de transporte público urbano tiene como elementos físicos básicos la infraestructura (vías, terminales, paraderos, instalaciones administrativas), los equipos (buses de diferentes tipos) y el elemento humano (conductores, empresarios, propietarios, autoridad gubernamental) y como ambiente al cual sirve dicho sistema se tiene al usuario del servicio. La interrelación, sistema – ambiente, se da a través de entradas y salidas, las entradas están dadas por aspectos tales como la forma de operación (rutas, horarios, parque automotor), la forma de administración o gestión y el diseño de los elementos del sistema. Las salidas están dadas por los viajes de pasajeros efectivamente realizados (pasajeros – periodo – vehículo – ruta – sentido). Si falla uno o más de los elementos del sistema o de las entradas, se producen deficiencias en las salidas y por ende en la prestación del servicio. De acá, la necesidad de establecer cómo es la operación y la calidad de servicio de dicho sistema de transporte, para lo cual es necesario ubicarlo dentro de un sistema de clasificación operativo y relacionar elementos físicos tales como vehículos, infraestructura vial y paraderos, que integran el sistema de TPCU.
- **Transporte público masivo TPM.** Es el servicio de transporte público que tiene derecho exclusivo de vía y opera sin interferencia de otro tránsito o peatones, a velocidades superiores a 30 KPH y moviendo grandes volúmenes de pasajeros. Esta orientado a prestar su servicio en grandes ciudades.
- **Transporte público individual TPI.** El transporte público individual es el servicio de transporte público que comparte la red vial y opera junto con los demás componentes del sistema de transporte, moviliza personas que solicitan el servicio de manera exclusiva, pagando una tarifa variable y no se ciñen a una ruta prefijada.

⁴ DUEÑAS RUÍZ, Domingo Ernesto. Libro Urbano: Editorial Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 1997.

1.1.2 Planeación del transporte público colectivo urbano. Es conveniente recalcar que se pueden considerar dos tipos de planeación: la planeación analítica que es el proceso bajo el cual se estudian, analizan y evalúan diferentes estrategias para diseñar y decidir sobre el mejor sistema de transporte que responda a las necesidades futuras de la ciudad y por otro lado la planeación operativa, en la cual se estudian, analizan y evalúan acciones tendientes a establecer el eficiente funcionamiento del sistema de transporte que responda a las necesidades de movilidad existentes o manifiestas.

- **Planeación analítica del TPCU.** La planeación analítica permite definir alternativas sobre transporte público urbano a corto, mediano y largo plazo. Cuando es a corto plazo, se integra con la planeación operativa y está orientada esencialmente hacia el establecimiento de acciones de funcionamiento del transporte público urbano. Cuando es a mediano o largo plazo, lo usual es que se definan alternativas que impliquen altas inversiones, teniendo en cuenta el plan de ordenamiento territorial de la ciudad y el plan maestro de transporte enmarcado en dicho plan. En este último caso, para establecer el equilibrio entre oferta y demanda bajo diferentes alternativas, este tipo de planeamiento usa modelos clásicos de transporte o integrados de transporte y uso del suelo en los cuales se estima la demanda utilizando modelos de generación, distribución, selección modal y asignación de los viajes a la red, es decir, se planifica para el futuro, al contrario de la de corto plazo, que planifica para situaciones inmediatas y como tal requiere de un conocimiento de la demanda manifiesta, sin necesidad de utilizar modelos complejos como herramienta de análisis.
- **Planeación operativa del TPCU.** En general, el problema básico de cualquier estudio de planeación operativa del TPCU, se refiere a la determinación de cómo debe ser la oferta para prestar un servicio eficiente en una red de transporte público, lo cual se logra a través de acciones operativas (o de funcionamiento), dirigidas a maximizar el uso de la infraestructura vial y de los equipos así como también de minimizar los costos de operación.

A continuación se da una descripción general del proceso recomendado para efectuar la planeación operativa siguiendo el “enfoque por sistemas”, éste se basa en el entendimiento global y comprensivo del sistema TPCU y tiene más que un carácter puramente metodológico, el propósito de identificar plenamente cuál es el problema en la prestación del servicio de transporte público, para formular acciones referentes a lo que se debe hacer y a la forma como debe ser tratada. La necesidad de usar este método de enfoque por sistemas, corresponde a la manera tan compleja como el sistema de transporte público se interrelaciona con el ambiente social y económico en el cual funciona.

El proceso de planeación operativa comienza por un reconocimiento de los tipos de problemas presentes y del ámbito en que se desarrollan y finaliza con el enfoque para su implementación, así como las actividades recomendadas para su control. Es de destacar que la división considerada en seis pasos, puede hacerse algo diferente y con mayor o menor desagregación según el tipo de aplicación. Lo importante al aplicar el “enfoque de sistemas” es recordar que se trata fundamentalmente de una filosofía para estudiar los problemas del transporte y sus acciones a seguir, su diseño exacto debe adaptarse a los requerimientos de cada caso específico.

Dueñas⁵ propone un proceso integrado por los siguientes pasos.

1. Reconocimiento del problema y de su dominio.
2. Recolección y almacenamiento de la información.
3. Características de la situación existente (Diagnóstico).
4. Generación de acciones operativas.
5. Diseño de la operación, análisis, evaluación y decisión.
6. Implementación y control.

La planeación operativa se basa en estudios de demanda y oferta manifiesta, para analizar y proponer acciones que mejoren el nivel de servicio y optimicen el costo de operación.

Los estudios de oferta son:

- Inventario de infraestructura vial, en el cual se registra la información sobre el estado y calidad de la red vial, paraderos y terminales.
- Inventario vehicular. Se registra el estado y características del parque automotor, y su organización.
- Inventario de rutas. Se describe el recorrido y características de las rutas autorizadas.

Los estudios de demanda son:

- Estudio de Contraste visual. Se utiliza principalmente el estudio para la fijación o determinación de los períodos típicos y la determinación del tamaño muestral necesario para la ejecución de los estudios de ascenso y descenso y de velocidad y demoras. La información a registrar en este estudio, es la proveniente de los formularios de aforos realizados en puntos determinados de la ruta; contiene esencialmente: la hora de paso del vehículo, la identificación del vehículo: la placa o el número interno, la ocupación en código o número de pasajeros.

⁵ DUEÑAS RUÍZ, Domingo Ernesto. Marco teórico para la programación de la operación: Editorial Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 1997.

- Estudio de Terminales. Este estudio tiene como objetivo principal, determinar los periodos típicos (cuando los vehículos están provistos de registradora o un sistema de conteo de pasajeros movilizados). Y a través de un censo establece el parque automotor activo, los tiempos de ciclo, de viaje y en el Terminal. La información que se registra sobre este estudio, es: identificación del vehículo, hora de salida y llegada al Terminal y lectura de registradora sobre pasajeros movilizados, la cual se toma en los terminales de la ruta en estudio. Como resultado del procesamiento de los datos, se obtiene la periodización, por sentido y para cada uno de los periodos típicos definidos, la frecuencia promedio de servicio, el número de despachos, el tiempo promedio en Terminal y el tiempo promedio de ciclo.
- Estudio de ascenso y descenso. Tiene como objetivo principal, determinar la fluctuación espacial de pasajeros a lo largo de una ruta. Este estudio se ejecuta de acuerdo con una muestra determinada con base en la información obtenida de los estudio de terminales o de contraste visual. En el procesamiento de la información, la expansión de los datos se desarrolla teniendo en cuenta los despachos encontrados en el estudio de terminales para cada periodo típico. Se registra: la hora, el número de pasajeros que suben al vehículo y el número de pasajeros que se bajan del vehículo. Las salidas que se obtienen son: el perfil de cargamento por periodo y por sentido identificando el tramo crítico, la demanda promedio de viaje, la demanda promedio horaria, el flujo medio de pasajeros y el índice promedio de renovación.
- Estudio de velocidad y demoras. Con la aplicación de este estudio se busca determinar las clases de demoras que se presentan, ya sean operativas o de tránsito, y las velocidades de marcha y de recorrido promedio de los vehículos, para un periodo, sentido y ruta determinada. Este estudio se realiza con base en la muestra determinada por medio del estudio de terminales o contraste visual, se aplica para todo el recorrido tomando información sobre la hora de la parada, el motivo de la detención y la hora de reinicio de la marcha. Las salidas del estudio de velocidad y demoras para cada uno de los periodos de tiempo definidos y para cada sentido, son: el tiempo medio de recorrido, el tiempo medio de marcha, la velocidad media de recorrido y la velocidad media de marcha, otra salida es la ponderación de la duración de las demoras según su tipo.

El nivel de servicio del transporte público se compone de ocho variables, cuatro cuantitativas (se pueden medir con instrumentos), asociadas al tiempo total del viaje, y cuatro cualitativas (se pueden estimar o apreciar), asociadas a la percepción de la calidad del viaje. Estas son:

Variabes cuantitativas

- Tiempo de acceso (accesibilidad) al sistema (v.g. caminando)
- Tiempo de espera en paraderos o estaciones
- Tiempo de viaje en el vehículo

- Tiempo empleado desde el paradero inicial hasta al destino.

Variables cualitativas

- Comodidad (v.g. hacinamiento o posibilidad de viajar sentado, protección y confort en paraderos o estaciones)
- Seguridad (v.g. posibilidad de no sufrir accidentes o asaltos)
- Confiabilidad (v.g. que el servicio pase, se detenga donde debe, se demore más o menos lo mismo en pasar, que el viaje demore más o menos lo mismo)
- Economía (percepción del usuario con respecto al costo de la tarifa.)

1.1.3 Calidad del Servicio. La calidad del servicio de un sistema de TPCU consiste en la capacidad de satisfacer los deseos de los usuarios que demandan el servicio, y se considera como nivel de servicio el indicador que mide dicha calidad a través de las variables que en ella influyen.

1.2 MODELADO Y SIMULACIÓN

Diversos autores han proporcionado conceptos de modelado y simulación, la mayoría de ellos presentan definiciones que conllevan a la unificación de criterios y a la globalización de esta terminología, a continuación se presenta las definiciones más relevantes.

1.2.1 Definición de modelado y simulación. Según Marvin Minsky⁶, "Un modelo (M), para un sistema (S) y un experimento (E), es cualquier cosa a la cual E puede ser aplicado a M de forma de responder preguntas sobre S".

Bernard Zeigler⁷ conceptúa sobre modelado lo siguiente: "Modelado significa el proceso de organizar el conocimiento acerca de un determinado sistema." Un modelo de un sistema es una herramienta que permite responder interrogantes sobre este último sin tener que recurrir a la experimentación sobre el mismo.

El modelado representa de forma organizada una idea sobre un tema o problema específico, llevándolo a cualquier nivel de abstracción, utilizando para ello cualquier técnica, es decir puede utilizar modelos gráficos, matemáticos, esquemas y demás herramientas que permiten el entendimiento de un concepto.

Por otra parte, simulación según Gilbert y Troitzsch⁸ es un tipo específico de modelización por el que se trata de representar la realidad de una forma simplificada.

⁶ MINSKY, Marvin. The Society of Mind. New York: Simon & Shuster, 1985.

⁷ ZEIGLER, Bernard P.; PRAEHOFER, Herbert; KIM, Tag Gon. Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discret Event and Continuous Complex Dynamic Systems. Academic Pr. 2000.

⁸ NIGEL, Gilbert y TROITZSCH, Klaus G.: Simulation for the Social Scientist. Open University Press 1999.

Shannon⁹, define simulación como “el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema”.

Las técnicas de simulación en el desarrollo de modelos pueden aplicarse de dos formas diferentes: la primera se utilizaría en la tarea relativamente mecánica de simular modelos matemáticos pre-existentes, mientras que la segunda se aplicaría en la tarea mucho más compleja de la descripción de procesos.

La simulación tiene como principal objetivo la predicción, es decir, puede mostrar lo que sucederá en un sistema real cuando se realicen algunos cambios bajo determinadas condiciones, permitiendo realizar ensayos en un sistema con el fin de elegir la mejor alternativa para ser implantada en un sistema real.

Tomando como referencia las anteriores definiciones se puede considerar que el modelado es la representación de una situación real de manera organizada y plasmada en cualquier medio, utilizando técnicas tales como modelos gráficos, matemáticos, esquemas, con el fin de mostrar una imagen auténtica de lo que fue abstraído de la realidad. Y simulación es el proceso mediante el cual se toman esos modelos y se realizan experimentos, utilizando métodos y técnicas que permitan el análisis del comportamiento de los componentes de un ambiente real.

1.2.2 Los pasos en un estudio de simulación. Un estudio basado en simulación consta de varios pasos. Según Banks¹⁰, estos son:

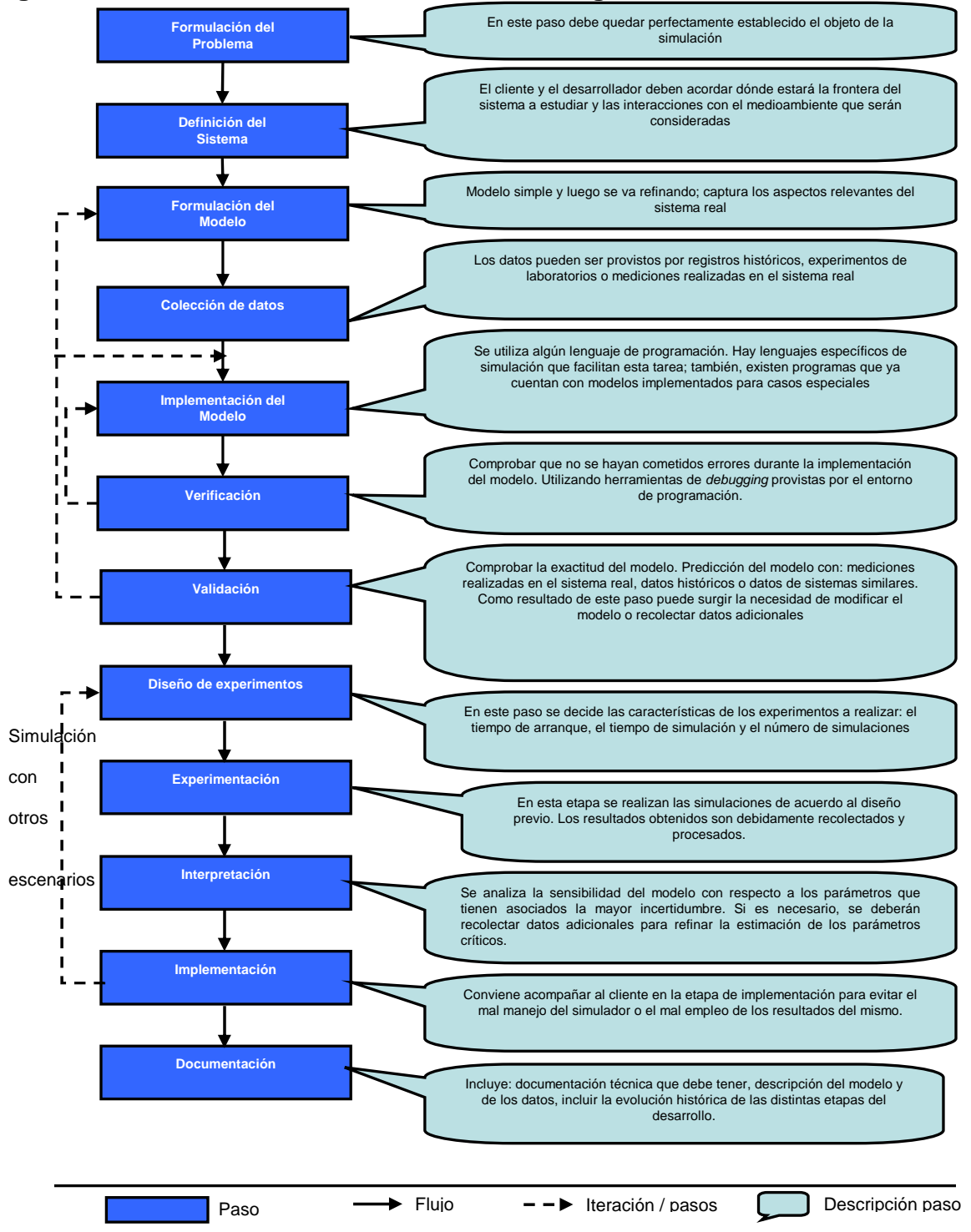
- Formulación del problema
- Definición del sistema
- Formulación del modelo
- Colección de datos
- Implementación del modelo en la computadora
- Verificación
- Validación
- Diseño de experimentos
- Experimentación
- Interpretación
- Implementación
- Documentación

El esquema general de los pasos en simulación se pueden observar en la Figura 2.

⁹ SHANNON, R.E. Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación. Trillas, México, 1988.

¹⁰ BANKS, J.; CARSON J. S. y B. L. Nelson: Discrete Event System Simulation. Prentice Hall. 1996.

Figura 2. Pasos en un estudio de simulación, según Banks



Fuente: Autores

En la figura 2, se observa cada una de las etapas que se deben realizar para llevar un proceso de simulación, se aprecia claramente las iteraciones que se deben generar (flujo con líneas discontinuas) para refinar cada vez más el modelo hasta que alcance un alto grado de validez y consistencia con los datos tomados de la realidad.

1.2.3 Tipos de simulación. Fishman¹¹, clasifica la simulación según la naturaleza del modelo empleado así:

- **Identidad:** Es cuando el modelo es una réplica exacta del sistema en estudio. Es la que utilizan las empresas automotrices cuando realizan ensayos de choques de automóviles utilizando unidades reales.
- **Cuasi-identidad:** Se utiliza una versión ligeramente simplificada del sistema real. Por ejemplo, los entrenamientos militares que incluyen movilización de equipos y tropas pero no se lleva a cabo una batalla real.
- **Laboratorio:** Se utilizan modelos bajo las condiciones controladas de un laboratorio. Se pueden distinguir dos tipos de simulaciones:
 - **Juego operacional:** Personas compiten entre ellas, quienes forman parte del modelo, la otra parte consiste en computadoras, maquinaria, etc. Es el caso de una simulación de negocios donde las computadoras se limitan a recolectar la información generada por cada participante y a presentarla en forma ordenada a cada uno de ellos.
 - **Hombre-Máquina:** Se estudia la relación entre las personas y la máquina. Las personas también forman parte del modelo. La computadora no se limita a recolectar información, sino que también la genera. Un ejemplo de este tipo de simulación es el simulador de vuelo.
- **Simulación por computadora:** El modelo es completamente simbólico y está implementado en un lenguaje computacional. Las personas quedan excluidas del modelo. Un ejemplo es el simulador de un sistema de redes de comunicación donde la conducta de los usuarios está modelada en forma estadística. Este tipo de simulación a su vez puede ser:
 - **Digital:** Cuando se utiliza una computadora digital.
 - **Analógica:** Cuando se utiliza una computadora analógica. En este grupo también se pueden incluir las simulaciones que utilizan modelos físicos.

Ceiller¹² presenta un resumen de una agrupación de los modelos de simulación dependiendo de diferentes criterios de clasificación, así: según las características espaciales los clasifica en concentrados y distribuidos; según la continuidad de la variable tiempo en continuos, discretos e híbridos; según la cuantificación de la variable dependiente en no-cuantizados y cuantizados; según la variación en los

¹¹ FISHMAN, G.S. Conceptos y métodos en la simulación digital de eventos discretos. Limusa. México. 1978.

¹² CEILLER FRANCOIS, E. Continuous System Modeling. Springer-Verlag. 1991

parámetros fijos y variables; según la propiedad de superposición en lineales y no-lineales y por último según la intervención de proceso aleatorio en estocásticos y determinísticos.

1.3 DINÁMICA DE SISTEMAS

El término dinámica, se refiere a los cambios que se producen en cada una de las partes de un sistema a lo largo del tiempo, como consecuencia de las interacciones que se producen entre ellas. La dinámica de sistemas (DS) se ocupa de analizar cómo las relaciones internas del sistema explican su comportamiento.

La dinámica de sistemas tiene su origen en los trabajos de Forrester¹³ conocidos como dinámica industrial, realizados a finales de los años cincuenta e implantados en los sesenta, a finales de los años sesenta se produce el primer informe al Club de Roma, sobre los límites del crecimiento mundial, basado en un modelo de dinámica de sistemas, en el que se analiza la previsible evolución de una serie de magnitudes agregadas a nivel mundial como son la población, los recursos y la contaminación. Como consecuencia de la exitosa publicación de las conclusiones reelaboradas de este estudio, se adoptó el término de dinámica de sistemas. Los campos de aplicación concreta de la dinámica de sistemas son variados, resaltando la construcción de modelos de simulación informática, tema de interés en este estudio.

La dinámica de sistemas se caracteriza por la búsqueda de soluciones útiles a problemas reales, usa modelos computacionales de simulación para entender y mejorar tales sistemas, basa los modelos de simulación, sobre modelos mentales, conocimiento cualitativo e información numérica, usa los métodos y discernimientos de la ingeniería de control y la realimentación y otras disciplinas científicas para estimar y mejorar la calidad de los modelos.

1.3.1 Diagramas causales. La descripción mínima de un sistema está dada por el conjunto de partes que lo componen y por la relación que establece cómo se produce la influencia entre esas partes. Este proceso se puede presentar de forma más sintética mediante un diagrama que represente los hitos más importantes que intervienen en el proceso, unidos entre sí mediante flechas que indican la influencia que se establece entre ellos, sobre cada flecha se registra la forma cómo esta influencia afecta a los elementos, con un signo (+) si la influencia es directamente proporcional y con un signo (-) si es inversamente proporcional; en algunos casos estas flechas forman una cadena circular o cerrada que se conoce como bucle de realimentación; este diagrama se denomina diagrama de influencias o causal y representa la estructura del sistema.

¹³ FORRESTER, Jay W. Industrial Dynamics. Productivity Press. 1986.

Los bucles de realimentación positiva (+) tienen un efecto reforzador y los de realimentación negativa (-) efecto estabilizador. En este tipo de diagramas también se puede incorporar un elemento que represente los retrasos en el tiempo, para esto se utiliza dos trazos (||) sobre la flecha correspondiente, estos indican la velocidad con que se produce la influencia.

Un sistema más complejo se compone de la combinación de varios bucles de realimentación, conformando lo que se conoce como arquetipos sistémicos o estructuras genéricas, se trata de situaciones típicas que se presentan en diversos problemas pero que admiten la misma descripción básica desde el punto de vista sistémico, Senge¹⁴ en su libro La quinta disciplina, hace una extensa presentación de los arquetipos sistémicos.

Con este diagrama esquemático, se puede observar el comportamiento del sistema, pero con consideraciones puramente cualitativas, sin tener herramientas para determinar exactamente y cuantitativamente el comportamiento del sistema.

1.3.2 Diagramas de Forrester. Para lograr observar el comportamiento cuantitativo del sistema, se clasifican y asocian variables a estos elementos, se puede considerar a los elementos principales como variables de nivel o variable de estado, y a las influencias como variables de flujo que afectan a las variables de nivel, también aparecerán unas variables auxiliares que representan pasos intermedios para la determinación de las variables de flujo a partir de las variables de nivel.

Esto se representa mediante un diagrama, donde a las variables se asocian íconos, a las variables de nivel un rectángulo y a las de flujo un ícono de una válvula o dos "z" entrelazadas, cuya apertura se regula mediante el flujo que representa esa variable; las variables auxiliares se representan con círculos. Este diagrama también se conoce como diagrama de flujos-niveles.

Al diagrama anteriormente descrito se asocian las ecuaciones funcionales del modelo, el conjunto de estas ecuaciones constituye la descripción matemática del proceso. En este modelo aparecen los parámetros del sistema y las variables exógenas, al darle valores numéricos a estos parámetros, el modelo se refiere a una situación particular. Este objeto matemático es el que se puede programar en un computador utilizando adecuados lenguajes o entornos informáticos de simulación.

En la actualidad existen entornos de simulación flexibles que permiten construir un modelo de forma gráfica en la pantalla del computador, empleando iconos, de modo que combinándolos, se llega a un diagrama de Forrester de forma directa. Estos entornos, una vez construido el diagrama, generan automáticamente las

¹⁴ SENGE, Peter. La quinta disciplina, Ediciones Granica. 1992.

ecuaciones. Una vez programado, se pueden generar las trayectorias de comportamiento de las variables de nivel, principalmente.

1.3.3 Proceso de modelado de sistemas. En las secciones anteriores se ha descrito un lenguaje con el que se puede dar una definición de la estructura y del comportamiento de un sistema, lo que se conoce como un modelo de ese sistema. La aceptación del término modelo que interesa, es la que se emplea como sinónimo de representación, específicamente la representación de un determinado aspecto de la realidad, con el detalle suficiente como para que se pueda utilizar en la investigación y en la experimentación en lugar del sistema real.

Existen varias tendencias metodológicas basadas en procedimientos, herramientas y técnicas diferenciadas que se manifiestan en tres tendencias. La primera se basa en modelos matemáticos exclusivamente, (Orientadas a la optimización) estas incluyen la programación lineal y los modelos de entradas y de salidas. La segunda se basa en los datos buscando curvas que se ajusten a los datos (Casuales), ejemplo la econometría. La tercera tendencia busca la realidad a través de un proceso interactivo entre la experiencia y la información, entre la mente y los datos (Causales); la simulación estocástica y la dinámica de sistemas forman parte de esta última tendencia.

Para llegar a la construcción de un modelo se debe seguir una serie de pasos que consiste en analizar la información que se tiene con relación al proceso, depurarla hasta reducirla a sus aspectos esenciales, y reelaborarla de modo que pueda ser transcrita al lenguaje sistémico, en este proceso Aracil¹⁵ distingue las siguientes fases:

“

- *Definición del problema.* En esta primera fase se trata de definir claramente el problema y de establecer si es adecuado para ser descrito con los útiles sistémicos que hemos desarrollado. Para ello el problema debe ser susceptible de ser analizado en elementos componentes, los cuales llevan asociadas magnitudes cuya variación a lo largo del tiempo queremos estudiar.
- *Conceptualización del sistema.* Una vez asumida, en la fase anterior, la adecuación del lenguaje sistémico elemental para estudiar el problema, en esta segunda fase se trata de acometer dicho estudio, definiendo los distintos elementos que integran la descripción, así como las influencias que se producen entre ellos. El resultado de esta fase es el establecimiento del diagrama de influencias del sistema.

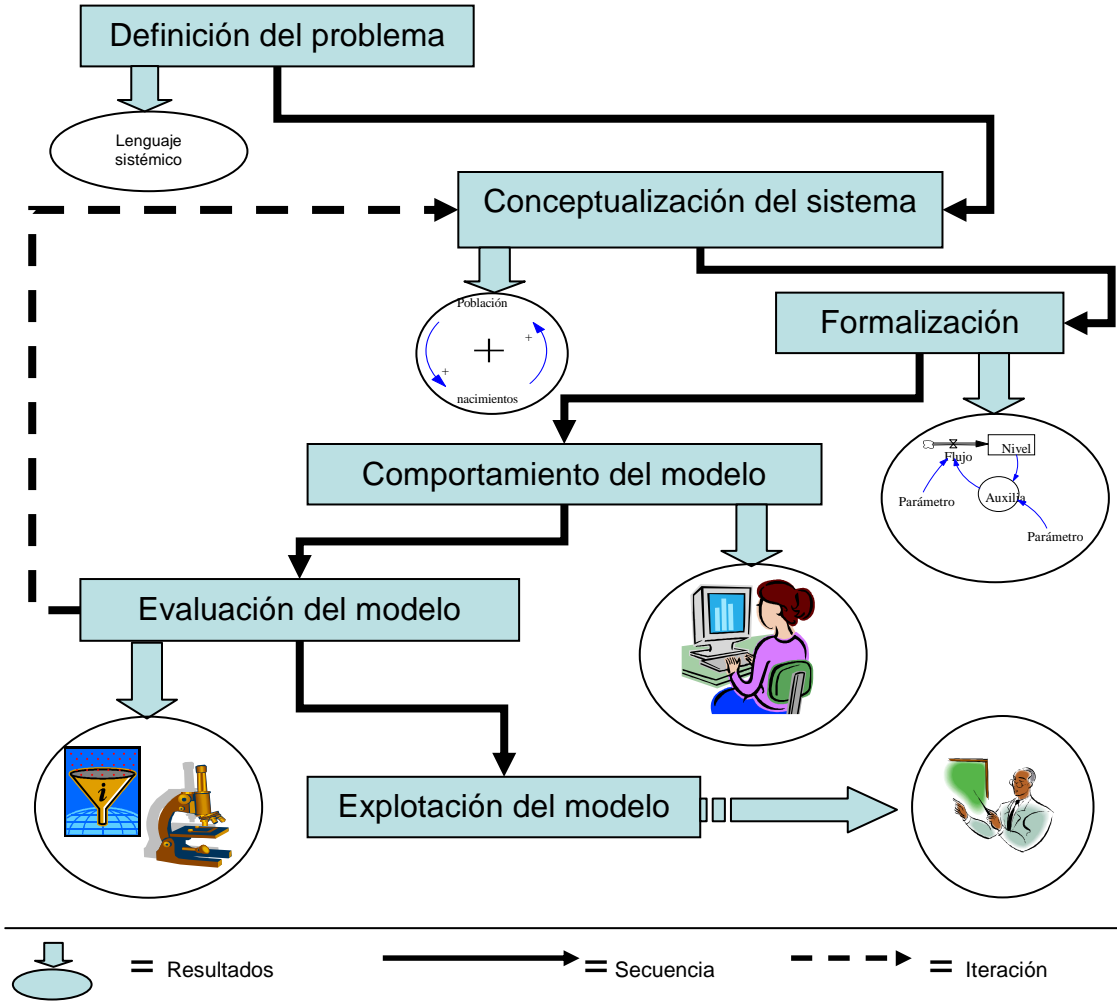
¹⁵ ARACIL, Javier. Dinámica de sistemas. ISDEFE C/Edison. Madrid. p58. 1995.

- *Formalización. En esta fase se pretende convertir el diagrama de influencias, alcanzado en la anterior, en el de Forrester. A partir de este diagrama se pueden escribir las ecuaciones del modelo (algunos entornos informáticos permiten hacerlo directamente). Al final de la fase se dispone de un modelo del sistema programado en un computador.*
- *Comportamiento del modelo. Esta cuarta fase consiste en la simulación informática del modelo para determinar las trayectorias que genera.*
- *Evaluación del modelo. En esta fase se somete el modelo a una serie de ensayos y análisis para evaluar su validez y calidad. Estos análisis son muy variados y comprenden desde la comprobación de la consistencia lógica de las hipótesis que incorpora hasta el estudio del ajuste entre las trayectorias generadas por el modelo y las registradas en la realidad. Así mismo, se incluye un análisis que permite determinar la sensibilidad del modelo, y por tanto, de las conclusiones que se extraigan de él, con relación a los valores numéricos de los parámetros que incorpora o las hipótesis estructurales.*
- *Explotación del modelo. En esta última fase el modelo se emplea para analizar políticas alternativas que pueden aplicarse al sistema que se está estudiando. Estas políticas alternativas se definen normalmente mediante escenarios que representan las situaciones a las que debe enfrentarse el usuario del modelo.”*

Además menciona que “el proceso de modelado no es secuencial, es decir al realizar una de las fases es muy probable que se deba volver a una fase anterior, es un proceso iterativo que combina los elementos conceptuales de la dinámica de sistemas hasta alcanzar un resultado final aceptable.

Para la construcción del modelo se parte de dos tipos de información, una información de magnitudes proveniente de registros históricos del comportamiento del sistema y otra de naturaleza muy variada con relación a como se producen las interacciones en el seno del sistema. Este último tipo de información es más relevante en la dinámica de sistemas y el primer tipo de información solo será de interés al final del proceso”. Un acercamiento al funcionamiento de este modelo se puede observar en la figura 3.

Figura 3. Fases para construir un modelo en dinámica de sistemas.



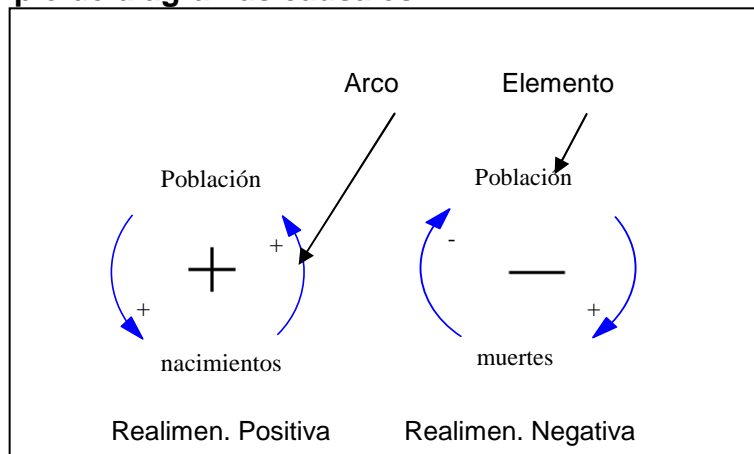
Fuente: Autores

En la figura anterior se observan las fases relacionadas con la creación de un modelo en dinámica de sistemas, que posteriormente será simulado. La flecha con línea continua muestra un orden para el abordaje de cada una de las etapas; la flecha con línea discontinua señala la iteración que debe existir entre las etapas, con el fin de obtener un refinamiento del modelo.

1.3.4 Simbología utilizada en dinámica de sistemas para representar los diagramas. Se presenta a continuación los elementos utilizados para los diagramas causales y de Forrester o de flujo de nivel.

Diagramas causales: Es la forma de representar elementos y relaciones (arcos orientados) que muestran el flujo de información o de material que hay en un sistema, además se incluye un signo más (+) o un signo menos (-) que muestra la influencia del mismo sentido o de sentido opuesto de los arcos según el caso, como se observa en la Figura 4:

Figura 4. Ejemplo de diagramas causales

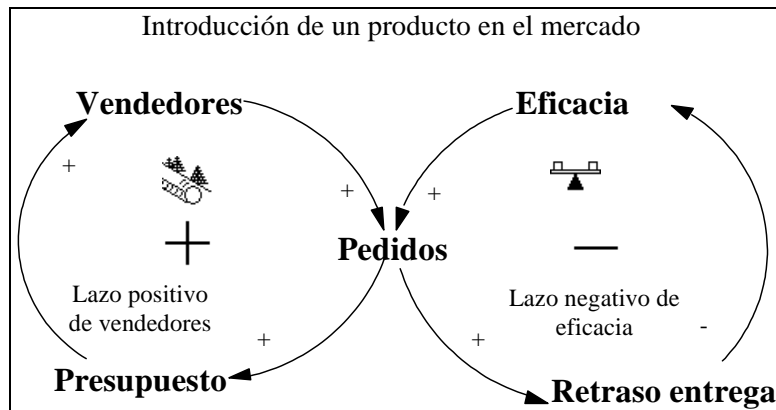


Fuente: Autores

En la figura anterior, los ciclos de realimentación representan el tipo de problema en los que trabaja la dinámica de sistemas.

En dinámica de sistemas una realimentación positiva representa casos de crecimiento o decrecimiento ilimitado (Figura 5), mientras que una realimentación negativa tiende a producir equilibrio en el sistema que se está tratando.

Figura 5. Ejemplo diagramas causales de realimentación positiva (+) y negativa(-)


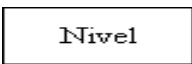
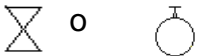

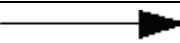

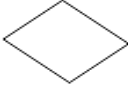
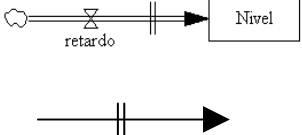


Fuente: Varios autores

En la figura anterior se observa una realimentación positiva (lazo positivo de vendedores), el cual indica que a mayor presupuesto, mas vendedores y con un mayor número de vendedores mayor cantidad de pedidos. Mientras la realimentación negativa (Lazo negativo de eficacia) indica que, con un menor tiempo de retraso en las entregas, hay más eficacia y por ende esto generará más pedidos.

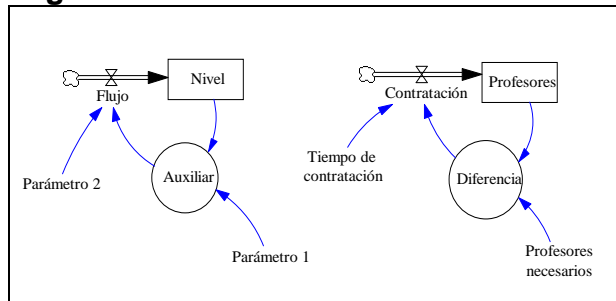
Diagramas de Forrester o de flujo – nivel: Como se mencionó en el numeral 1.3.2 estos diagramas presentan variables de nivel o variable de estado, variables auxiliares, canales de materiales, parámetros entre otros. En la Figura 6 se observa cómo a cada uno de estos elementos se asocia un ícono representativo, que a través del tiempo en el desarrollo de la dinámica de sistemas, se han ido estandarizando.

Figura 6. Simbología diagramas de Forrester

	Nube: Representa la fuente inagotable de información dentro del modelo.
	Nivel: Es la variable de estado; representa una acumulación de flujos.
	Flujo: Es la variación de un nivel; representa un cambio en el estado del sistema.
	Canal de Material: Es la transmisión de una magnitud física que se conserva
	Canal de Información: Es la transmisión de información que no se necesita conservar
	Variable Auxiliar: Cantidad con cierto significado para el modelador (que no siempre tiene un significado físico en el mundo real) y con un tiempo de respuesta instantáneo
	Parámetro: Es un elemento del modelo independiente del sistema o una constante propia del sistema que no varía durante una corrida de simulación
	Retardo: Es un elemento que simula retrasos en la transmisión de información o de material entre los elementos del sistema. La primera imagen representa demora o retardo en material y el segundo retardo de información.

Un ejemplo de diagrama de Forrester o de flujo de nivel, se pueden observar en la Figura 7, que muestra la relación directa o indirecta que poseen cada uno de los elementos antes mencionados.

Figura 7. Ejemplo diagramas de Forrester



Fuente: Autores

1.3.5 Ecuaciones que generan los modelos basados en dinámica de sistemas. Las ecuaciones diferenciales de primer orden son las manejadas dentro del enfoque de la dinámica de sistemas, un ejemplo de ello se observa en la ecuación (1).

$$N(t + \Delta t) = N(t) + f(N(t), (E - S)\Delta t) \quad (1)$$

Donde $N(t)$ es el estado de una variable de nivel en un tiempo t y $N(t+\Delta t)$ es el estado que toma la variable en un fracción de tiempo. La función f normalmente dependerá de factores de entrada (E) y de salida (S) que afectan el nivel y se obtiene de manera empírica. Así cuando Δt tiende a cero se obtiene, lo representado en la ecuación (2):

$$\delta n / \delta t = f(n(t), t) \delta t \quad (2)$$

La predicción en el sistema es obtener la serie que se muestra en la ecuación (3):

$$N(t), N(t+2D t), N(t + 3D t) \dots \quad (3)$$

1.4. AGENTES

A continuación se describen las definiciones más relevantes sobre conceptos de agente, metodología para simulación con agentes, herramientas para modelamiento lógico de agentes para simulación.

1.4.1 Definiciones de agente. Berthet¹⁶ define agente como una entidad, semi o completamente autónoma, la cual actúa racionalmente de acuerdo con sus percepciones del exterior y el estado de su conocimiento. Para Berthet la estructura de los agentes se puede dividir en dos partes. La primera es el conocimiento que el agente posee acerca del mundo exterior, las habilidades de otros agentes y las suyas propias, así como sus tópicos de interés; el segundo es el procesamiento dinámico que el agente realiza de los mensajes y que definirá su actividad de razonamiento ante problemas e informaciones nuevas. La comunicación entre agentes es fundamental con el fin de poder interactuar de forma casi inteligente, además maneja un nivel de comunicación interno que lo utiliza para sus propios componentes, y un conjunto de métodos para procesar estos mensajes.

Los lenguajes para programar los agentes según Shoham¹⁷ se definen como: “Un lenguaje de agentes es un sistema que permite programar sistemas computacionales, software o hardware, en términos de algunos conceptos desarrollados en teorías o modelos formales de agentes”. Shoham fue uno de los primeros que propuso un nuevo paradigma para la programación de agentes.

1.4.2 Sistemas Multi-Agentes. Los modelos de sistemas multiagentes, se caracterizan por estar constituidos por agentes que interactúan entre sí y con el entorno de una forma independiente. Estos agentes están contruidos por pequeños programas autocontenidos que son capaces de controlar sus propias acciones basándose en su percepción, completa o parcial, del entorno en que se mueven.

Gilbert y Troitzsch¹⁸, han propuesto una serie de etapas que han de seguirse en el desarrollo de cualquier modelo de simulación, incluidos los multiagente, si se desea que sean metodológicamente correctos.

Los campos en los cuales se utilizan agentes, son tan diversos que han atraído a personas de diversas disciplinas tales como la sociología, psicología, ingeniería del software, inteligencia artificial, ingenieros en transporte, entre otros y cada uno de los miembros de estas comunidades tiende a ver el problema desde su perspectiva.

Tanto la inteligencia artificial distribuida (IAD), como en general el desarrollo de sistemas distribuidos, basados en la resolución de problemas complejos mediante la colaboración de un conjunto de elementos individuales, han evolucionado hacia la utilización de agentes y sistemas multiagente (SMA).

¹⁶ BERTHET S.; DEMAZEAU Y.; BOISSIER O. Knowing each other better. 11th International Workshop on Distributed Artificial Intelligence. Glen Arbor. 1992.

¹⁷ SHOHAM Y. Agent-oriented programming. Technical Report STAN-CS-1335-90. Computer Science Department. Stanford University, Stanford. CA. 1990.

¹⁸ GILBERT N. y TROITZSCH K. G.: Simulation for the Social Scientist, Open University Press 1999.

El paradigma orientado a agentes se basa en dos importantes abstracciones, una es que los agentes son autónomos y la otra que los agentes tienen conocimiento. Wooldridge¹⁹ plantea las principales características de los agentes inteligentes, estos deben ser: autónomos, concurrentes, reactivos y proactivos.

En la Tabla 1 se puede observar la comparación propuesta por Bernard²⁰ quien plantea algunas de las diferencias más significativas que se presentan en el uso de modelos de simulación tradicionales y los modelos de simulación basados en agentes.

Tabla 1. Diferencias en la utilización de modelos de simulación

SIMULACION TRADICIONAL	SIMULACION BASADA EN AGENTES
Determinístico (Un futuro)	Estocástico (Múltiples futuros)
Localizada (Top-Down)	Aditiva (bottom-up)
Basada en ecuaciones y formulas	Agentes
No brinda explicación	Poder de explicación
Pocos parámetros	Muchos parámetros
Ambiente dado	Ambiente creado
Usted reacciona	Usted aprende

Fuente: Bernard

1.4.3 Metodología de simulación con agentes. Al igual que las metodologías orientadas a objetos ofrecen guías para la identificación de objetos y las interdependencias entre ellos, existen metodologías para el modelado y diseño de sistemas multi-agente, la mayoría basadas en UML, éstas son base para el desarrollo de software basadas en agentes, entre otras se tienen: BDI²¹, MAS-CommonKADS²², GAIA²³, MASSIVE²⁴, JADE²⁵; por otro lado la simulación basada en agentes, presenta guías que muestran como se puede descomponer un problema de este tipo, y cómo afectará un diseño en el funcionamiento general del

¹⁹ WOOLDRIDGE, Michael. Agent Based Software Engineering. Department of Computing Manchester Metropolitan University. United Kindom. Disponible en <http://www.csc.liv.ac.uk/~mjlw/pubs/abse.pdf>, Mayo de 2008.

²⁰ BERNARD. Robert N, Using Adaptive Agente-Based simulation models to assist planners in policy development: The case of rent control. Department of Urban Planning and Policy Development.

²¹ KINNY, D., y Georgeff, M. Modelling and Design of Multi-Agent Systems. Springer-Verlag. 1997.

²² IGLESIAS, C.; Garijo, M.; Gonzalez, J.; y Velasco, J. Analysis and design of multi agent systems using MASCommonKADS. Springer Verlag 1998.

²³ WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R.; y KINNY, D.. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analisis and Design. Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 15. 2000.

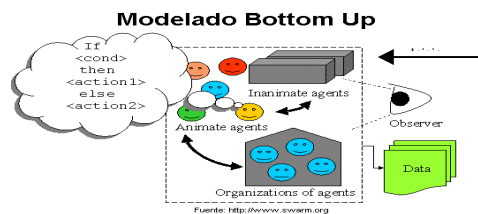
²⁴ LIND, J. MASSIVE: Software Engineering for Multi-agent Systems. Tesis Doctoral, DFKI. 1999.

²⁵ BELLIFEMINE, F.,POGGI, A., RIMASSA, G. Developing multi-agent systems with JADE. In Intelligent Agents VII. Ed. Castelfranchi, C. and Lesperance.2001

sistema. Ese diseño puede realizarse, desde una perspectiva top-down²⁶ o bottom-up²⁶. Tomando como referencia lo anterior se plantea para este trabajo, utilizar la técnica Bottom-up la cual se describe a continuación.

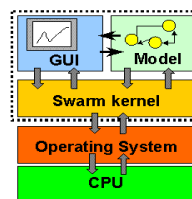
La técnica denominada Bottom-up²⁷, y que según Samper Márquez²⁸, en su página sobre agentes, es base de la arquitectura de agentes reactivos, modela de lo particular a lo general, es decir de abajo hacia arriba, ya que se visualiza en primer lugar, el sistema en cada una de sus partes (agentes inanimados), luego se asocian reglas a cada uno de estos agentes (agentes animados), en seguida se reúnen sociedades de agentes (organización de agentes) y por último se genera cualquier tipo de análisis del comportamiento de esos agentes (datos), esta secuencia de pasos se pueden observar en la Figura 8.

Figura 8. Modelo Bottom up para agentes



1.4.4 Elementos de una simulación basada en agentes. La plataforma Swarm, desarrollada por el Instituto Santa Fe, ver Figura 9, presenta un entorno de desarrollo basado en agentes, la cual es utilizada en el ámbito de las ciencias sociales. Esta plataforma la integra una colección de librerías dirigidas a la simulación dinámica de sistemas discretos complejos con agentes heterogéneos.

Figura 9. Estructura de la plataforma Swarm



Fuente: www.swarm.org

1.4.5 UML. Lenguaje Unificado de Modelado. Es un lenguaje gráfico que permite especificar, visualizar, construir y documentar los diferentes elementos que

²⁶ SAMPER MÁRQUEZ, Juan José. Trabajo sobre Agentes Inteligentes. Disponible en la página web: <http://www.neoyet.com/Agentes.htm>, Febrero de 2008.

²⁷ SWARM.ORG. Técnicas de modelado utilizados por la plataforma Swarm basada en agentes, www.swarm.org, Enero 2008.

²⁸ SAMPER MÁRQUEZ, Juan José, AGENTES INTELIGENTES, http://www.wikilearning.com/arquitecturas_de_agentes_ii-wkccp-5095-10.htm, Febrero 2008.

componen un software, así como para el modelado del negocio y otros sistemas no software²⁹.

Se dispone de dos tipos diferentes de diagramas los que dan una vista estática del sistema y los que dan una visión dinámica³⁰. Al realizar un modelado con UML se pretende cubrir tanto la estructura interna de cada uno de los elementos que integran un sistema de software como su comportamiento, razón por la cual es posible entender un sistema compuesto por agentes.

Los diagramas estáticos son:

- **Casos de Uso.** Utilizados para llevar a cabo el análisis de requisitos. Se utilizan para recoger los requisitos funcionales de las aplicaciones.
- **Diagrama de clases.** Muestra las clases, interfaces, colaboraciones y sus relaciones. Son los más comunes y dan una vista estática del proyecto.
- **Diagrama de objetos.** Es un diagrama de instancias de las clases mostradas en el diagrama de clases. Muestra las instancias y como se relacionan entre ellas. Se da una visión de casos reales.
- **Diagrama de componentes.** Muestran la organización de los componentes del sistema. Un componente se corresponde con una o varias clases, interfaces o colaboraciones.
- **Diagrama de despliegue.** Muestra los nodos y sus relaciones. Un nodo es un conjunto de componentes. Se utiliza para reducir la complejidad de los diagramas de clases y componentes de un gran sistema. Sirve como resumen e índice.

Los diagramas dinámicos son:

- **Diagrama de Interacción.** Pueden ser de dos tipos: Diagrama de secuencia, y Diagrama de colaboración. Muestran los diferentes objetos, sus relaciones y los mensajes que se envían entre ellos. Son dos diagramas diferentes, que se puede pasar de uno a otro sin pérdida de información, pero que dan puntos de vista diferentes del sistema.
- **Diagrama de estados.** Muestra los estados, eventos, transiciones y actividades de los diferentes objetos. Son útiles en sistemas que reaccionen a eventos.
- **Diagrama de actividades.** Es un caso especial del diagrama de estados. Muestra el flujo entre los objetos. Se utilizan para modelar el funcionamiento del sistema y el flujo de control entre objetos.

²⁹ Object Management Group, 2001. OMG Unified Modeling Language Specification. www.omg.org.

³⁰ JACOBSON Ivor; BOOCH, Grady; RUMBAUGH, J.. El Lenguaje Unificado de Modelado. Madrid, Ed. Addison Wesley. 1999.

2. ESTADO DEL ARTE

En ésta sección se presenta el conocimiento existente basado en los trabajos de investigación, tesis de grado, herramientas de simulación, técnicas y demás tópicos relacionados con la investigación que se desarrolló en éste trabajo; por ende se presentan los trabajos más importantes relacionados con los tópicos base de esta investigación: Transporte y Simulación.

2.1 TRANSPORTE

El estado del arte que ocupa la parte del transporte en el cual se fundamenta esta investigación se puede mostrar en tres secciones, la primera está dada para mostrar algunas técnicas para la simulación de modelos de transporte; la segunda en aplicaciones informáticas para la planificación del transporte y la tercera muestra algunos estudios y trabajos realizados alrededor del TPCU. A continuación se describe cada una de ellas.

2.1.1 Simulación de modelos de transporte. En el análisis de modelos de transporte actualmente existen varias metodologías, técnicas y herramientas que tienen gran utilidad en la planeación de los sistemas de transporte a nivel macro, entre los más utilizados para la modelación y planeación se encuentra el sistema EMME/2, el cual permite analizar el comportamiento de la red de transporte bajo diferentes escenarios. En cada uno de ellos, se pueden obtener los volúmenes de autos, los tiempos de recorrido y las velocidades en cada uno de los tramos; si se desea analizar una zona con mayor detalle, es conveniente realizar una encuesta sobre el origen de los que llegan a ella y sobre el destino de los que salen. Esta información se sustituye en la columna y el renglón respectivos de la matriz origen-destino; de igual manera, se sustituye la oferta y la demanda de los viajes a la zona y se realiza un balanceo de la matriz con las herramientas del Sistema EMME/2; en el transporte público, al analizar los resultados, se muestra la ocupación promedio o máxima, lo cual indica si es necesario añadir vehículos a la ruta. Para esto, debe modificarse el tiempo en minutos que existe entre el paso de dos vehículos.

2.1.2. Aplicaciones informáticas para la planificación del transporte. El proceso necesario para la planeación del transporte requiere manipular volúmenes de datos significativos, es por esto que están disponibles en el mercado un conjunto

de aplicaciones informáticas que posibilitan el ajuste y diseño de los modelos, así como su posterior aplicación.

Dentro de las aplicaciones más populares se encuentran:

- U.T.P.S. (Urban Transport Planning System).
- TRIPS. (TRansport Improvement Planning System).
- TP+. (Transportation Planning Plus).
- VIPER. Un interfaz gráfico bajo Windows con funcionalidad de un Sistema de Información Geográfica - SIG
- TRANPLAN. (TRANsportation PLANning).
- ACCMAP.
- SATURN (Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks)
- MINUTP.
- TRANSCAD: integra un SIG con las herramientas de análisis de Transporte.
- CUBE. Es una familia completa de productos de software para la predicción de viajes, de fácil uso, capacidades comprensivas para la planeación de sistemas de transporte.

Al realizar el análisis de las características ofrecidas por los programas anteriormente mencionados, se observa que enfatizan en soluciones de problemas de planeación analítica del transporte multimodal y no en la planeación operativa del transporte público colectivo urbano.

2.1.3. Trabajos y área relacionadas con el Transporte Público. En el área del transporte y en el medio que ocupa este estudio, es decir ciudades intermedias y ciudades con características similares en cuanto a tamaño y nivel de organización, se han propuesto algunos trabajos basados en modelos de simulación que intentan mejorar la calidad del movimiento de personas y cosas por una red vial urbana; pero la mayoría de los trabajos están orientados a evaluar y analizar el impacto de algunos factores puntuales en el flujo vehicular (tránsito) dentro de la ciudad, ya que este es el elemento con el que el usuario percibe la calidad del servicio de transporte, como por ejemplo Gonzalez³¹ propone un modelo de tráfico para la ciudad de Puebla (México) que permite analizar diferentes situaciones a través de la simulación.

En el País, los trabajos desarrollados en simulación para sistemas de transporte se han hecho para ciudades grandes que tienen sistema de transporte masivo, por ejemplo Serrano³² plantea un modelo basado en simulación de eventos discretos para la evaluación de sistemas de transporte masivo.

³¹ GONZÁLES CALLEROS, J.M. ¿Cómo mejorar el flujo vehicular por medio de la simulación?, Ciencias computacionales. Instituto de Astrofísica, óptica y Electrónica. Puebla, México. Disponible en <http://ccc.inaoep.mx/~grodrig/Descargas/ArtJuan.pdf>, Abril de 2008.

³² SERRANO, Á. Un modelo de simulación para la evaluación de sistemas de transporte público masivo. Departamento de Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá Colombia, 2005.

También existen otros trabajos, que mediante la simulación buscan medir el impacto ambiental de algunos factores inherentes al tráfico, como son la polución, ruido, stress, etc. Como lo propuesto por Rall³³, que presenta alternativas basadas en un análisis dinámico urbano, para disminuir el impacto del ruido producido por el tráfico en zonas urbanas.

García del Valle³⁴ plantea la utilización de agentes en la simulación de los procesos de gestión dinámica y optimización de rutas para el transporte de mercancías peligrosas.

Existen algunos otros trabajos que tratan tópicos relacionados con el transporte, y tocan de manera tangencial la planeación operativa de un sistema TPCU, tal como el trabajo relacionado con el diseño y optimización de rutas y frecuencias en el transporte colectivo urbano, modelos y algoritmos, presentado por los autores Antonio Mauttone, Héctor Cancela, María Urquhart, pertenecientes al Departamento de Investigación Operativa, Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, de la ciudad de Montevideo en Uruguay, el cual es un aporte importante en cuanto al diseño de rutas, relacionado con la planeación analítica del transporte, pero que sin lugar a dudas es un área diferente a la planeación operativa, tema de estudio en éste trabajo³⁵.

Por otro lado, aparece un estudio elaborado y expuesto en un foro regional, organizado por la Universidad del Valle, en el año 2004, donde el Dr. Moller³⁶ muestra la situación actual del servicio del transporte público en general (incluido el TPCU), en el que se denota que éste es deficiente, en cuanto a la calidad de servicio que se presta, pues evalúa algunas variables que agudizan este problema como es la rapidez, la comodidad, el costo, entre otros; siendo otro de los motivos de refuerzo e iniciativa para proseguir con este trabajo de investigación.

Gómez Restrepo³⁷, realizó un trabajo de investigación relacionado con el estado del arte en la modelación de problemas de tránsito y entre los tópicos principales que presenta éste trabajo se encuentran: la ingeniería de tránsito, métodos de simulación, simulación por computadores, modelos matemáticos, redes de computadores; además el trabajo describe la forma en la que el transporte avanza

³³ RALL, J.C., Análisis dinámico urbano: Nuevos enfoques para actuar contra el ruido. Facultad de arquitectura, planeamiento y diseño. Universidad Nacional del Rosario. Río Bamba. Argentina.

³⁴ GARCÍA DEL VALLE, A., Optimización de rutas, seguridad en el transporte y sistemas GIS. Escuela Politécnica Superior. Universidad de la Coruña España.

³⁵ MAUTTONE, Antonio; CANCELA, Héctor y URQUHART, María. Diseño y optimización de rutas y frecuencias en el transporte colectivo urbano. Montevideo, Uruguay. En: <http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0307.pdf>, Mayo de 2008.

³⁶ MOLLER, Rolf. Universidad del Valle. Primer Foro Regional de Transporte Intermodal y Logística: Diagnóstico y Perspectivas, Santiago de Cali, Colombia, Marzo 4 de 2004.

³⁷ GOMEZ RESTREPO, Alejandro, El estado del arte en la modelación de problemas de tránsito, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, 2005.

hacia mecanismos informatizados para el tratamiento de diversos problemas sociales relacionados con ésta área de la ingeniería.

Este trabajo de grado fue planeado para ser implantado en la ciudad de Tunja, lugar que fue escogido como unidad de análisis por los investigadores, además de poder aplicar los conceptos y técnicas anteriormente mencionadas en una de las rutas importantes de la ciudad. En la actualidad, las empresas que prestan el servicio de TPCU, no cuentan con un medio adecuado para poder evaluar la calidad del servicio en esta ciudad, razón por la cual se espera al culminar este trabajo, se pueda adoptar en cualquiera de estas empresas.

2.2 SIMULACION

A continuación se presentan algunos de los trabajos de simulación basados en agentes y dinámica de sistemas, además del software de implementación de estas técnicas y se mostrarán algunas herramientas informáticas multiparadigma.

2.2.1 Trabajos relacionados con la simulación. Se muestra a continuación, algunas tesis de maestría y doctorado de universidades alrededor del mundo, relacionadas con simulación basada en agentes y con dinámica de sistemas.

- Simulación del Proceso de Compra de Artículos en un Mercado Virtual con Agentes BDI³⁸. El propósito de este trabajo fue el estudio, análisis y desarrollo de un sistema multiagente cuyo objetivo fue la simulación del proceso de toma de decisiones en la compra y venta de productos en un ambiente virtual.
- Diseño de la Plataforma de Simulación de Sistemas Multiagentes GALATEA³⁹. Esta plataforma de simulación de sistemas multiagentes, es una colección de software para simular, sobre modelos escritos en lenguajes de diversa naturaleza: procedimental, orientada a los objetos, dinámica de sistemas y orientación a los agentes. Tesis de Maestría, Postgrado en Computación, Universidad de Los Andes, Mayo 2002 - Venezuela.
- Simulación mediante agentes computados⁴⁰. El propósito es iniciar un camino en el desarrollo de modelos de simulación mediante agentes económicos computados. Tesis de Maestría en Economía, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de la Plata, Argentina, 1999.

³⁸ PACHECO CALCÍN, Oscar. Universidad Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Brasil. <http://clei2004.spc.org.pe/es/html/pdfs/73.pdf>, Abril 2008.

³⁹ GRUPO GALATEA. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida Venezuela. Información disponible en: <http://mistoy.ing.ula.ve/INVESTIGACION/PROYECTOS/GALATEA/GALWEB/organizamarcos.htm>, Abril 2008.

⁴⁰ DI GRESIA, Luciano Mario. Universidad Nacional de la Plata Argentina. <http://www.depeco.econo.unlp.edu.ar/doctrab/doc13.pdf>, Abril 2008.

- Simulador configurable por calle, carril, semáforo, cruce y diversos tipos de agentes⁴¹. Tesis de Doctorado en Inteligencia Artificial, Centro de Sistemas Inteligentes Tecnológico de Monterrey, basada en simulación de tráfico.

Los trabajos que se muestran a continuación fueron desarrollados como tesis doctorales de la Universidad de Barcelona, España⁴² y están ligados directamente con la simulación basada en agentes.

- Simulación basada en agentes: agentes autónomos y categorización. El propósito de éste trabajo fue desarrollar un modelo dinámico de categorización en agentes autónomos, implementarlo en una aplicación informática y realizar un informe científico.
- Simulación basada en agentes: análisis de redes sociales. El trabajo propuesto fue desarrollar un modelo dinámico de redes sociales basado en agentes, implementarlo en una aplicación informática y realizar un informe científico.
- Simulación basada en agentes: aprendizaje imitativo y cooperación. En el cual se desarrolló un modelo dinámico de aprendizaje imitativo y cooperación en agentes, luego se implementó en una aplicación informática y se realizó un informe científico.
- Simulación basada en agentes: estimación de parámetros en sistemas sociales²². En este trabajo se propuso, Desarrollar técnicas de estimación de parámetros para un modelo dinámico de sistema social basado en agentes, implementarlo en una aplicación informática y realizar un informe científico.
- Simulación basada en agentes: propiedades psicológicas de los agentes. En éste se propuso, desarrollar un modelo de procesos psicológicos básicos en agentes, implementarlo en una aplicación informática y realizar un informe científico
- Algunos de los trabajos doctorales y de maestría en simulación con agentes, con dinámica de sistemas y simulación con transporte se pueden encontrar en la Web de la Universidad de los Andes⁴³.
- En el trabajo "Dinámica de los sistemas retamar-pasto del centro de la Península Ibérica"⁴⁴, se puede observar la creación de diagramas causales para sistemas complejos, además de mostrar el alcance de la Dinámica de sistemas y el tratamiento de esta clase de sistemas.

2.2.2 Software de simulación para dinámica de sistemas. Para la simulación de un sistema se tienen herramientas informáticas especialmente diseñadas para

⁴¹ CENTRO DE SISTEMAS INTELIGENTES, ITESM, México, Dr. Leonardo Garrido, <http://www.csi.mty.itesm.mx/~lgarrido/Personal/thesisProjects.pdf>, abril 2008.

⁴² UNIVERSIDAD DE BARCELONA, http://www.ub.es/comporta/doct0103_treballs_llista_e.html, Enero 2006.

⁴³ UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Mérida, Venezuela, http://cesimo.ing.ula.ve/INVESTIGACION/public_tesis.html, Febrero de 2008.

⁴⁴ LÓPEZ-PINTOR ALARCÓN, Antonio, Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá, <http://www.aeet.org/ecosistemas/013/articulo3.htm>, Junio 2001.

la dinámica de sistemas, algunas de las más empleadas son: Professional DYNAMO, STELLA, I-think, PowerSim, VenSim, Mosaikk-SimTek.

2.2.3 Software de modelado y simulación multiparadigma. A continuación se presentan algunas herramientas de software existentes en el mercado, que utilizan diversas técnicas para la simulación por computador, además de poder ser instalados en diversos sistemas operativos.

- Swarm (licenciamiento GNU. Instituto Santafé): Uno de los entornos de desarrollo basado en agentes de uso más difundido en el ámbito de las ciencias sociales. Está formado por una colección de librerías dirigidas a la simulación dinámica de sistemas discretos complejos con agente heterogéneos.
- RePast (Universidad de Chicago – Investigación en Ciencias Sociales). Utiliza muchas de las características de Swarm.
- eM-Plant (Tecnomatix Technologies Ltd.). Simulación de eventos discretos orientada a objetos.
- AnyLogic. Herramienta de simulación con soporte para simulación de eventos discretos, simulación con dinámica de sistemas y con agentes.

3. METODO DE INVESTIGACIÓN

La metodología y métodos que se usaron para la investigación, se describen con detalle, a través de lo plasmado en el enfoque, las características relacionadas a la población, la muestra, instrumentos, prueba piloto y otros argumentos. A continuación se desarrolla cada uno de estos ítems.

3.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

Mediante la descripción del enfoque metodológico, se plasman los procedimientos generales tenidos en cuenta para llevar a cabo la investigación, es así como se describe la forma y tipo de investigación, utilizados.

3.1.1 Forma de Investigación. Haciendo referencia a Tamayo y Tamayo⁴⁵, se ha utilizado una investigación aplicada, ya que es el estudio y aplicación de la investigación a problemas concretos, en este caso el sistema del transporte público colectivo urbano en la Ciudad de Tunja.

3.1.2 Tipo de Investigación. Por otro lado según Best⁴⁶, el tipo de investigación que se llevó a cabo en este trabajo es descriptiva, ya que comprende la descripción, registro y análisis e interpretación de la naturaleza de un sistema actual. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre cómo una persona, grupo o cosas se conduce o funciona en el presente.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE UN SISTEMA TPCU.

El proceso que se comenta en este numeral, permite ver de forma clara el mecanismo de razonamiento que contextualiza el área de actividad de un sistema de transporte público colectivo urbano en ciudades pequeñas e intermedias; mostrando dentro del TPCU, el comportamiento del principal actor, como lo es el usuario del sistema.

Dentro de la cotidianidad urbana, se presenta la necesidad de desplazamiento de personas de un lugar a otro con el objeto de realizar diferentes tipos de

⁴⁵ TAMAYO Y TAMAYO, Mario. El proceso de la investigación científica. Ed. Limusa, México, 2003.

⁴⁶ BEST, J. W., Como investigar en educación.

actividades, utilizando para ello diferentes medios de transporte que pueden ser de carácter privado o público, los medios de transporte público a su vez pueden ser individuales o colectivos. El servicio de transporte público colectivo urbano es ofrecido por empresas que cuentan con un parque automotor acondicionado para tal fin y que se rigen por normas establecidas por el estado, que buscan que el servicio sea prestado en las condiciones adecuadas a los usuarios. Estas empresas a su vez, tienen rutas y horarios autorizados previamente.

El proceso de viajar en un medio de TPCU, comienza en el momento en que una persona toma la decisión de realizar un viaje desde el sitio donde se encuentra hacia un lugar de destino, para esto debe desplazarse al paradero que le ofrezca la ruta de transporte adecuada, una vez allí debe esperar un tiempo prudencial a que aparezca un bus y luego se cuestiona “¿es mi ruta?”, si la respuesta es negativa debe continuar esperando, en caso contrario se cuestiona nuevamente “¿es el tipo de bus adecuado para mi gusto?”, si es afirmativa su apreciación, realiza señal de parada, pero sino, se cuestiona nuevamente “¿dispongo de suficiente tiempo para llegar a mi destino?”, si la respuesta es afirmativa, espera otro vehículo de su gusto y ruta, en caso contrario le realiza la señal de parada, para realizar el viaje. En caso de realizar la señal de detención y el vehículo no se detiene, espera otro vehículo, en caso contrario, analiza si hay cupos disponibles, si hay disponibilidad asciende al vehículo, una vez allí se realiza la siguiente pregunta: “¿hay sillas disponibles?”, en caso afirmativo se sienta, pero si no, viaja de pie, cada vez que el vehículo se detiene la persona se cuestiona “¿es mi paradero?”, si lo es, desciende, sino, continúa en su lugar (si está sentado), pero si va de pie analiza si ahora hay sillas disponibles para ocupar una de ellas, este último proceso se realiza hasta llegar al paradero de destino. Al finalizar la ruta en el vehículo y haber descendido de este, se dirige a su destino final.

El proceso descrito anteriormente es realizado por cada una de las personas que hacen uso del TPCU y que posee ciertas características como son: edad, género y preferencias en la escogencia de un vehículo de transporte. Ellos son los generadores de viajes y que tiene por lo general un motivo, un horario, una hora de salida del origen, una hora de llegada al destino, además de un origen y un destino. Asociado a estas características se presenta algo importante para estos individuos como es el tiempo y la distancia del origen al paradero, el tiempo y la distancia de recorrido, el tiempo y la distancia del paradero al destino.

Otro de los procesos involucrados en el transporte de personas en un sistema TPCU, es sin duda el realizado por el vehículo. Un vehículo inicia su proceso en el denominado Terminal de Transporte, el conductor de dicho vehículo analiza en cada momento si es hora de su salida y si tiene la autorización para cubrir una ruta, en caso de no cumplir con alguna o ninguna de estas características entra en un estado de espera, de lo contrario empieza el desplazamiento del vehículo, a su vez el conductor está pendiente de cumplir con los diferentes tipos de detención

del vehículo, como son las paradas obligatorias (señales de alto, cruces, semáforos), en caso de encontrar alguna, el vehículo es detenido hasta tener la autorización o señal de continuar, en caso de ser una persona quien realiza una señal de parada, se detiene el bus siempre y cuando lleve cupos libres, permitiendo que la persona tome la decisión de ascender o no al vehículo, una vez realizada esta acción, el vehículo continúa su marcha. En caso de ser un paradero, el vehículo se detiene y empieza un tiempo de espera, al llegar a este límite de tiempo o antes si el conductor lo decide, el vehículo continúa su marcha. Este proceso se realiza de forma similar hasta que el vehículo llegue al final de la ruta asignada.

El procedimiento anterior es llevado a cabo por cada uno de los vehículos, los cuales cumplen con el cubrimiento de una ruta, y cuyas características presentadas son: un itinerario que se compone de un origen y un destino de ruta asignando un tiempo determinado para cubrirla, puntos de parada con tiempos de espera predefinidos para cada uno, puntos de paso, además de tener asociada una tarifa y un horario (hora de salida del origen, hora de llegada al destino).

3.3 ENTIDADES ASOCIADAS AL SISTEMA TPCU.

Del análisis de los elementos que intervienen en el sistema TPCU se pueden identificar los atributos que a continuación se describen, así como se presentan algunas características asociadas con cada uno de éstos.

Vehículo: Es el medio automotor de desplazamiento colectivo utilizado por las personas para ir de un lugar de origen a un destino dentro del perímetro urbano, siguiendo una ruta predeterminada, mediante el pago de una tarifa.

Atributos asociados

- Capacidad
 - Numero de sillas.
 - Pasajeros de pie.
- Tipo.
- Velocidad máxima de desplazamiento.

Usuario: persona que hace uso del servicio de TPCU.

Atributos asociados

- Edad.
- Sexo.

Viaje: es el recorrido que realiza una sola persona usando uno o varios medios de transporte de un punto de origen a uno de destino.

Atributos asociados

- Motivo.

- Horario.
 - Hora salida del origen
 - Hora llegada del destino.
- Origen
- Destino.
- Tiempo/distancia del origen al paradero.
- Tiempo/distancia de recorrido.
- Tiempo/distancia del paradero al destino.

Paradero: es el lugar donde un usuario puede ascender o descender de un vehículo de TPCU.

Atributos asociados

- Ubicación geográfica
- Capacidad de servicio

Ruta: recorrido que siguen los vehículos de transporte público, considerando reglas operacionales propias. El término ruta se utiliza en transporte público colectivo y el de línea en transporte público masivo.

Atributos asociados

- Itinerario.
 - Origen
 - Puntos de parada.
 - Puntos de paso.
 - Destino
- Tarifa
- Horario
 - Hora de salida del origen
 - Hora de llegada al destino

Despacho: es el recorrido de un determinado vehículo por la ruta que inicia a una determinada hora.

Despachador: es el ente encargado de generar los despachos de acuerdo con una programación preestablecida

Programación: es la entidad que mantiene el horario (salida del terminal de origen) de despacho de los vehículos del sistema TPCU

Infraestructura de la red vial: son las vías públicas por las cuales se desplazan los vehículos y los usuarios.

Atributos asociados

- Geometría de la vía. (anchos de calzada, ancho de andenes, anchos de carril, número de calzadas y número de carriles, pendientes, tipo y estado de la capa de rodadura.)

- Velocidad promedio asociadas al tiempo (hora y día de la semana).
- Demoras.

Es importante aclarar que algunas de las entidades asociadas al TPCU y definidas anteriormente son candidatas a designarse como agentes, la categorización y especificación lógica definitiva se tratará en la sección 4.

Las variables asociadas con la medición de la calidad del servicio que se ofrece en un sistema TPCU, son: la comodidad y la rapidez. Las cuales serán tratadas en los procesos de simulación generados por este trabajo. Una breve definición de cada una de ellas sería:

Comodidad: Estado en el que existen pocas molestias y esfuerzo corporales, y produce bienestar. La comodidad para efectos de este estudio, esta dada en la relación entre el tiempo total del viaje y el tiempo de viaje que el pasajero va sentado. Índice de comodidad = tiempo de viaje sentado / tiempo de viaje total. Este tiempo de viaje total, es el tiempo transcurrido desde que el pasajero asciende al bus en el paradero origen hasta que desciende en el paradero destino.

Rapidez: Velocidad impetuosa o movimiento acelerado. En este estudio, se toma rapidez como la relación entre la distancia de desplazamiento y el tiempo total en que se logra dicho desplazamiento, este incluye el tiempo de espera y las demoras forzadas.

3.4 UNIVERSO DE APLICACIÓN DEL SIMULADOR

La población objetivo está enmarcada en la Ciudad de Tunja, que se escoge como Ciudad tipo para éste estudio, por ser de tamaño intermedio, prototipo del medio latinoamericano andino, y por tener un registro de información disponible de la caracterización de los viajes desde 1993.

Tunja, Capital del Departamento de Boyacá, está ubicada en la parte centro oriental de Colombia, a 120 kilómetros de Bogotá y a una altura de 2.720 metros sobre el nivel del mar; tiene una extensión de 270 hectáreas y presenta un relieve con pendientes fuertes y terrenos ondulados. La población aproximada del área urbana en 1993, según el DANE, es de 102.000 habitantes. La población es en su mayoría joven: el 76% es menor de 35 años; las actividades principales son educativas, institucionales y comerciales. Según el Acuerdo Municipal No. 0016 de 2004⁴⁷, la cantidad de habitantes proyectada para el año 2004 es de 116.420.

⁴⁷ ALCALDÍA MAYOR DE TUNJA. Acuerdo Municipal 0016 de 2004. Por medio del cual se adopta el Plan de Desarrollo del Municipio de Tunja "Restauración social, económica y moral 2004-2007" 2004.

La ciudad se encuentra localizada estratégicamente sobre ejes viales importantes que la comunican con los llanos orientales, la Costa Atlántica y el centro del país.

Tunja limita por el norte con los municipios de Motavita, Combita y Oicatá, al oriente con Chivatá, Soracá y Boyacá; al Sur con Ventaquemada y por el Occidente con Samacá, Cucaita y Sora.

La ciudad cuenta con una red vial urbana de 90 kilómetros de longitud, el 90% de los cuales son de tipo local; el TPCU utiliza el 12% de estas vías, y se identifica un corredor que es utilizado por el 78% del sistema.

El servicio de TPCU es prestado en la actualidad por cuatro empresas, con un parque automotor compuesto en su mayoría por vehículos de tipo buseta y microbús, con capacidades entre quince y treinta y cinco sillas.

3.5 UNIDAD DE ANÁLISIS

La muestra representativa o unidad de análisis tomada para esta investigación, está dada por la selección de una ruta de congestión y tráfico común; la ruta cubre una arteria vial de la Ciudad, esta ruta tienen como origen el paradero ubicado en el Barrio Reten Sur y como destino, el paradero del barrio los Muiscas (Ver Anexo A), ubicado en la parte final del barrio, este barrio es un polo de atracción de viajes en varios periodos del día, ya que posee un sector educativo importante (Una universidad, varios colegios públicos y privados). La ruta en cuestión posee una longitud de 8.37 kilómetros, los cuales son cubiertos en 35 minutos (tiempo asignado por el resultado generado de un estudio de rutas e implementado por la mayoría de las empresas que prestan el servicio de TPCU en la Ciudad de Tunja) por un vehículo de transporte público colectivo urbano.

3.6 ELABORACIÓN, SELECCIÓN Y DESARROLLO DE INSTRUMENTOS

En esta parte de la investigación, se tomó como referencia los estudios de ascenso y descenso de pasajeros y los estudios de contraste visual, referenciados en el marco teórico del presente trabajo y que fueron elaborados y analizados por el grupo de investigación GIDPOT de la UPTC parte de los cuales están plasmados en el documento “Calidad del servicio en el sistema de transporte público en buses en ciudades pequeñas e intermedias”⁴⁸. Toda la información relacionada con la investigación llevada a cabo por este grupo la encuentra en Colciencias⁴⁹.

⁴⁸ DUEÑAS RUÍZ, Domingo Ernesto. Calidad del servicio en el sistema de transporte público en buses en ciudades pequeñas e intermedias. Ed. Universidad Politécnica De Valencia. Valencia, España. 2005.

⁴⁹ Colciencias. http://zulia.colciencias.gov.co:8081/grupos.war/search/EnGrupoInvestigacion/xmlInfo.do?nro_id_grupo=00863102VGLK49. Abril de 2006.

3.7 VALIDEZ

Los datos han sido procesados y validados por varios subgrupos que han tenido trabajos relacionados dentro del grupo GIDPOT de la UPTC. La información está disponible en medio magnético en la Biblioteca Central de la UPTC⁵⁰ y en medio impresa⁵¹.

3.8 CONFIABILIDAD

Los datos presentados en este informe, han sido validados y corroborados por el grupo de investigación GIDPOT de la UPTC, además han servido como base para algunas otras investigaciones⁵²⁻⁵³. Este proceso se encuentra documentado y disponible en la Facultad de Ingeniería, Unidad del Centro de Estudios, Investigación y Educación Continuada, CEDEC, de la Facultad de Ingeniería de la UPTC, y registrado como producto en Colciencias⁵⁴.

3.9 APOYOS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Los datos recolectados en el trabajo de campo, a través de las encuestas y observaciones directas, fueron procesados en una aplicación implementada en Dbase⁵⁵, y extraída posteriormente para el análisis de este trabajo en una base de datos implementada en Microsoft Access, ya que la herramienta utilizada para la simulación realiza una lectura directa sobre los datos almacenados en ésta.

3.10 HIPÓTESIS PLANTEADAS.

Las hipótesis planteadas en este trabajo de investigación se relacionan con las técnicas utilizadas para medir el problema que atañe a la planeación operativa de un sistema de transporte público colectivo urbano, en cuanto al índice de medida de

⁵⁰ Trabajo Docente. Programación de la operación del transporte público colectivo urbano, herramientas computacionales. Código de búsqueda 233.8. Ubicación Geográfica C956. Disponible en: Sección C Biblioteca Central UPTC. Medio magnético..

⁵¹ Tesis de pregrado Ingeniería de Transportes y Vías. Programación de la operación del transporte público colectivo urbano - herramientas computacionales. Código de búsqueda: T5302.

⁵² BERNAL G, Arquímedes y JIMENEZ G, Edwin. Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Escuela de Transportes y Vías. CEDEC. TV Tesis 822. 2004.

⁵³ BARRETO V., Claudia y ESPINEL B., Yolita, Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería, Escuela de Transportes y Vías. CEDEC. TV Tesis 827. 2004.

⁵⁴ DUEÑAS RUÍZ, Domingo Ernesto, Método para determinar la calidad del servicio en el Transporte Público Colectivo Urbano. Ed. UPTC. 2003. p 81.

⁵⁵ Trabajo Docente. Programa computacional para estudios de velocidades y tiempos de recorrido. Código de búsqueda 223.5 Disponible en: Sección C Biblioteca Central UPTC. Medio magnético.

la calidad del servicio prestado por éste, además de poderlas utilizar de forma independiente para llevar a cabo un análisis microscópico y macroscópico del problema de investigación. Las hipótesis son:

H₁. ¿Es posible a través de las técnicas de simulación basadas en dinámica de sistemas y agentes, medir la calidad del servicio prestado por un sistema TPCU?

H₂. ¿La simulación basada en agentes es una técnica apropiada para la simulación microscópica de problemas sociales como el sistema TPCU?

H₃. ¿La simulación con dinámica de sistemas es apropiada para llevar a cabo un análisis macroscópico de un sistema TPCU?

3.11 PLAN DE PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.

En primera instancia se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la metodología llevada a cabo para la construcción de los modelos lógicos de simulación, luego se presentan y explican los modelos físicos, implementados en la herramienta AnyLogic (herramienta de simulación seleccionada para este fin), posteriormente se describen los pasos que se deben seguir para la instalación del software de simulación, tanto para agentes como para dinámica de sistemas. A continuación se presenta la forma de manipulación del software de simulación, resultante de los ajustes implementados dentro de AnyLogic. Finalmente se alimenta el sistema con los datos seleccionados para un experimento de simulación, ya preestablecidos y almacenados en la base de datos que contiene los valores de los parámetros, con el fin de llevar a cabo el análisis de la información para determinar la medida de la calidad del servicio en un sistema de Transporte Público Colectivo Urbano, en cuanto a comodidad y rapidez.

4. RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

Como se comentó en la sección anterior, a continuación se presentarán los resultados obtenidos en el desarrollo del trabajo de investigación llevado a cabo, desde la construcción de los modelos, hasta llegar a la presentación del análisis de resultados.

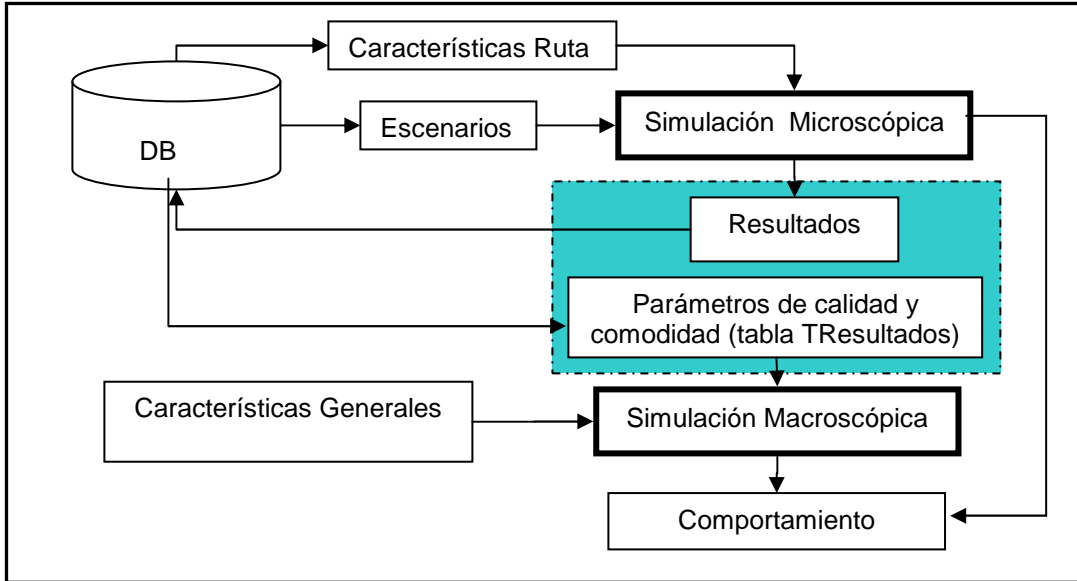
4.1 DETERMINACIONES PRELIMINARES PARA LA SIMULACIÓN DE LOS MODELOS.

En este numeral, se muestra, en primera instancia la interacción o acople entre los dos modelos micro y macroscópico, en segunda instancia, se describe la herramienta de implementación de los modelos, en tercera instancia se describe la persistencia de los datos, que permitieron el almacenamiento de los parámetros utilizados para las diferentes simulaciones y finalmente se presenta el escenario que se creó con datos extraídos de la información existente de las bases de datos del grupo GIDPOT sobre las calificaciones resultantes del análisis de las variables rapidez y comodidad.

4.1.1 Interacción de los modelos macroscópico y microscópico. Luego de poblar la base de datos con los parámetros de la simulación microscópica (base de datos desarrollada en Access), se ejecuta el simulador basado en agentes (microscópica), éste produce una serie de resultados que son almacenados en una tabla denominada TResultados, dichos datos sirven como parámetros para la simulación macroscópica (simulación con dinámica de sistemas).

En la figura 10, se observa cómo los “Resultados” obtenidos por la simulación microscópica se almacenan en la base de datos (DB), y posteriormente son utilizados como “Parámetros de calidad y comodidad” en la entrada (cuadro con líneas discontinuas), además se incluye las características generales de tipo socioeconómico asociadas a la ciudad, para simular el modelo macroscópico y así obtener un comportamiento tanto micro como macroscópico.

Figura 10. Esquema de interacción entre modelos micro y macroscópico



Fuente: Autores

4.1.2 Herramienta de implementación de modelos. La herramienta seleccionada para la implementación de los modelos y posterior simulación en ésta investigación fue AnyLogic, por ser una herramienta para simulación multiparadigma y la idea inicial fue realizar un análisis sobre el mismo sistema (TPCU) pero con don técnicas de simulación diferentes, por eso pareció interesante ver la construcción de estos modelos con la misma herramienta. Las características más relevantes de ésta herramienta de simulación se puede observar en el Anexo B.

4.1.3 Persistencia de los datos. Los datos obtenidos para la creación de los diversos escenarios (parámetros) que se utilizan en éste trabajo, fueron obtenidos de un software creado en Dbase por el Grupo de Investigación GIDPOT y que almacena archivos con extensión DBF, se revisaron los datos relacionados con los elementos que se trabajaron para la creación de los modelos, tales como: la ruta de análisis, parque automotor, tramos, los paraderos, frecuencia de llegada de personas a un determinado paradero, los tiempos de cubrimiento de un vehículo en una determinada ruta y otros que se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2. Información almacenada en tablas de DBASE

Información	Nombre de la Tabla
Rotación de personas en los distintos paraderos de la ruta	RORUTA04.BDF
Ruta 4 → Reten Sur – Muiscas (itinerarios)	ITINES.BDF
Datos de los Vehículos	PLACA.DBF

Análisis de periodos de tiempo (picos y valles)	PERIODOS.DBF
Sitios claves en una ruta (permiten configurar velocidades y otros)	SITIOS.DBF
Datos de contraste visual – (análisis de ocupación de los vehículo)	CONTRAST.DBF
Ubicación y nombre de paraderos	PARADERO.DBF

Fuente: Grupo de investigación GIDPOT

La información que allí se almacenó no presenta una normalización de datos que permita llevar a cabo el análisis deseado para éste estudio; razón por la cual se llevo a cabo un modelado físico de los datos y se produjo como resultado un modelo relacional acorde con los datos que se necesitan para alimentar los parámetros de la simulación. El modelo generado se puede observar en el Anexo C.

4.1.4 Escenario real extraído de la información proporcionada por el grupo GIDPOT. Los datos reales que se tomaron para el análisis de la información relacionada con las variables comodidad y rapidez, fueron procesados de estudios realizados por el Grupo de Investigación GIDPOT de la UPTC y los cuales se basaron en información obtenida por el diligenciamiento del formulario modelo tomado del libro de Dueñas Domingo, páginas 99 y 101 respectivamente. El número de encuestas analizadas fue de 75.

En cuanto a la comodidad y rapidez del viaje se tienen en cuenta tres factores fundamentales que son:

- Edad del viaje (persona que se desplaza de un lugar origen a un lugar destino, en un momento determinado). Para el análisis de éste factor se tomaron varios rangos así:
 - Niño (a): Persona entre 7 y 12 años
 - Joven (Masculino y Femenino) Persona entre 13 y 17 años
 - Adulto (a): Persona entre 18 y 60 años
- Genero del viaje (Femenino o Masculino)
- Motivo del viajes (Razón por la cual se realiza el viaje). Estos motivos son:
 - Estudio
 - Trabajo
 - Ocio
 - Compras
 - Hogar

Los resultados ponderados, para la valoración de la medida de las variables comodidad y rapidez, reflejada en los tres factores (edad, género, motivo del viaje), se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Ponderaciones tomadas por el grupo GIDPOT.

Combinación de variables / Combinación de Factores	Comodidad Alta	Comodidad Media	Comodidad Baja	Rapidez Alta	Rapidez Media	Rapidez Baja
Niño (a)	>50%	>20%<50%	1%	50km/h	35km/h	25km/h
Joven (f ó m)	70%	40%	20%	35km/h	25km/h	15km/h
Adulto (a)	100%	80%	60%	30km/h	20km/h	10km/h
Trabajo	80%	50%	20%	60 km/h	40 km/h	30 km/h
Ocio	100%	70%	20%	40 km/h	30 km/h	20 km/h
Estudio	80%	50%	20%	60 km/h	40 km/h	30 km/h
Compras	100%	70%	50%	40 km/h	30 km/h	20 km/h
Hogar	80%	60%	40%	40 km/h	30 km/h	25 km/h
Masculino	80%	50%	20%	70 km/h	50 km/h	40 km/h
Femenino	100%	80%	50%	60 km/h	40 km/h	30 km/h

Fuente: Grupo de investigación GIDPOT

Para la descripción de la medida de la calidad de forma cualitativa y cuantitativa, concluida por el grupo GIDPOT y evidenciada en el libro de Dueñas, se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Equivalencia de medidas cualitativas y cuantitativas.

Cuantitativa	Calificación	Literal	Cualitativa
> 4.5	5	A	Excelente
3.5 - 4.5	4	B	Buena
2.5 - 3.4	3	C	Regular
1.5 - 2.4	2	D	Mala
0.5 - 1.4	1	E	Pésima
< 0.5	0	F	Inaceptable

Fuente: Grupo de investigación GIDPOT

Los parámetros iniciales del estudio llevado a cabo por el grupo GIDPOT, se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Escenario real, tomando parámetros de encuestas elaboradas por el Grupo GIDPOT.

PARAMETRO	VALOR PARAMETRO
Ruta	Reten Sur – Muiscas
Día	Viernes
Hora	6:00 a.m. a 10:00 p.m.

Número de Vehículos	27 Buses
Despachos en el día	97 Despachos/Día
Capacidad vehicular utilizada día	3100 Viajes
Capacidad vehicular máxima día	3350 Viajes
Intervalo de tiempo de envío de despachos	15 minutos hora valle 5' minutos hora pico

Fuente: Grupo de investigación GIDPOT

Los resultados promedio (condensando la información generada en un día en el sistema TPCU real) por cada una de las variables de análisis respecto a los factores y tomada de encuestas y análisis estadísticos de fuentes manuales del grupo GIDPOT, fueron:

Nivel de servicio en cuanto a comodidad: **3,75**

Nivel de servicio en cuanto a rapidez: **2,50**

Con la obtención de los datos anteriores se puede concluir que la calidad de servicio prestada por el sistema TPCU, actualmente, en cuanto a comodidad es **BUENA** y en cuanto a rapidez es **REGULAR**.

4.2. SIMULACION DE MODELOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SERVICIO DE UN SISTEMA TPCU

El análisis y diseño de los modelos para la simulación que se desarrollaron están dados por dos modelos basados, uno en dinámica de sistemas que permita realizar un análisis a partir del comportamiento global del sistema (macroscópico) y otro basado en agentes a partir del comportamiento de cada uno de los elementos que conforman el sistema (microscópico), todo en función de evaluar la calidad del servicio prestado en cuanto a comodidad y rapidez de una empresa que tiene su objeto social fundado en TPCU. Ambos modelos permiten mostrar el comportamiento del tiempo empleado por los usuarios desde el lugar de origen al lugar de destino, además de analizar qué proporción de este tiempo lo realizaron en condiciones de comodidad adecuadas, es decir, sentados.

En este apartado se presentan los aspectos relacionados con la simulación basada en agentes y la simulación con dinámica de sistemas.

4.2.1 Simulación Microscópica. El análisis microscópico del sistema TPCU se lleva a cabo con simulación basada en agentes. En este numeral se muestra cómo se llegó a un modelo conceptual representado por las principales

características de los agentes que participan en un sistema de TPCU, mediante la técnica de modelado Bottom up; además se hace uso de UML, para crear los principales diagramas que representan el comportamiento estático y dinámico del sistema. A continuación se plantea una serie de etapas para generar dicho modelo.

En este trabajo se propone llevar a cabo las siguientes etapas para la simulación de un sistema complejo basada en agentes, haciendo uso de un software de simulación. Estas son:

- 4.2.1.1 Contextualización y análisis del sistema a simular
- 4.2.1.2 Modelamiento del sistema
- 4.2.1.3 Crear la interfaz gráfica de usuario
- 4.2.1.4 Crear escenarios a experimentar
- 4.2.1.5 Simular los modelos con un software
- 4.2.1.6 Obtener resultados
- 4.2.1.7 Analizar resultados

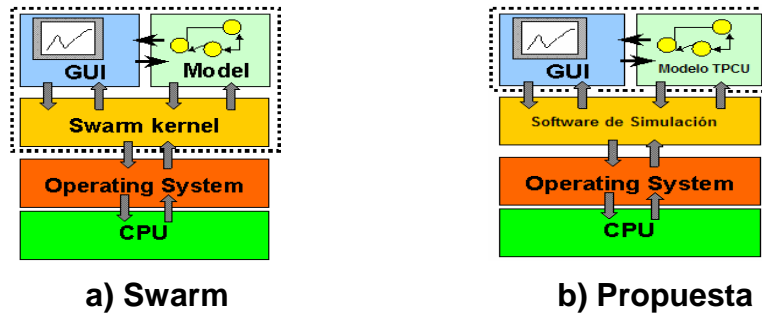
A continuación se presenta el desarrollo de la cada una de estas fases.

4.2.1.1 Contextualización y análisis del sistema a simular. Esta etapa se desarrolló utilizando como base la técnica Bottom up y los diagramas UML, en primera instancia se presentan los elementos de la simulación en TPCU, luego se desarrollan los modelos con UML, para el análisis del sistema y finalmente se realiza la especificación lógica de los agentes que interactúan con el sistema TPCU, basados en lógica de primer orden para especificar la conducta de cada uno.

- **Elementos de la simulación en TPCU.** Los elementos involucrados en la simulación basada en agentes planteada para este trabajo se basa en la propuesta del Instituto Santa Fe, es decir la estructura Swarm. En la Figura 11a, se observa la propuesto en Swarm, a ésta se le realizan algunas modificaciones, la parte Swarm Kernel es remplazada por un software de simulación (que remplaza el desarrollo de una aplicación informática para la implantación de los modelos), en la gráfica 11b, las áreas delimitadas por la línea punteada son desarrolladas por quien implemente la simulación; la GUI se debe generar con técnicas y herramientas como las expresadas en Pressman⁵⁶, y el modelo TPCU con ayuda de UML.

⁵⁶ PRESSMAN Rogger. Software Engineering. A practitioner's Approach. Ed. MacGraw-Hill, 2005.

Figura 11. Estructura de Swarm y estructura propuesta.



- **Modelado con UML.** La diagramación para modelar el proceso de operación y análisis de un sistema TPCU, se llevó a cabo con UML. Con este lenguaje se desarrollaron los diagramas de casos de uso, diagrama de clases, diagramas de estados y de actividades del sistema TPCU. La reutilización de componentes fue un factor importante (la estructura de un agente, puede ser utilizada para cualquier cantidad de éstos), debido a que un artefacto, término utilizado por Larman⁵⁷, puede ser utilizado en uno o más modelos dentro de un sistema, además de trabajar la orientación a objetos⁵⁸⁻⁵⁹, técnica en la que se fundamentan los agentes.
 - **Diagrama de casos de uso.** Los diagramas de casos de uso, permiten realizar un análisis detallado de los actores y de las principales actividades que presenta un sistema de cualquier grado de complejidad (análisis del sistema a simular). En el caso particular del sistema de transporte público colectivo urbano, se presentan los siguientes actores: usuario, paradero, vehículo y ruta. Además se presentan cinco casos de uso que definen la funcionalidad del sistema completo, estos son: desplazar a paradero origen, seleccionar servicio, realizar viaje, detener en paradero destino, desplazar a destino final de viaje. En este tipo de diagramas se observa la interacción de los diferentes actores con cada uno de los casos de uso. En el caso de estudio de este documento, se parte bajo la premisa que el usuario tiene creada una necesidad de viaje, y éste debe realizar una serie de acciones para poder llegar al destino final. Empieza por desplazarse al paradero del cual parte (origen), al encontrarse en el paradero debe seleccionar una ruta de viaje, es decir planear cual será su itinerario, selecciona un vehículo, realiza el viaje, termina su recorrido en el paradero destino y por último se desplaza al lugar de destino final. Este es el proceso que debe seguir una persona que desee hacer uso del sistema TPCU. La utilidad de los

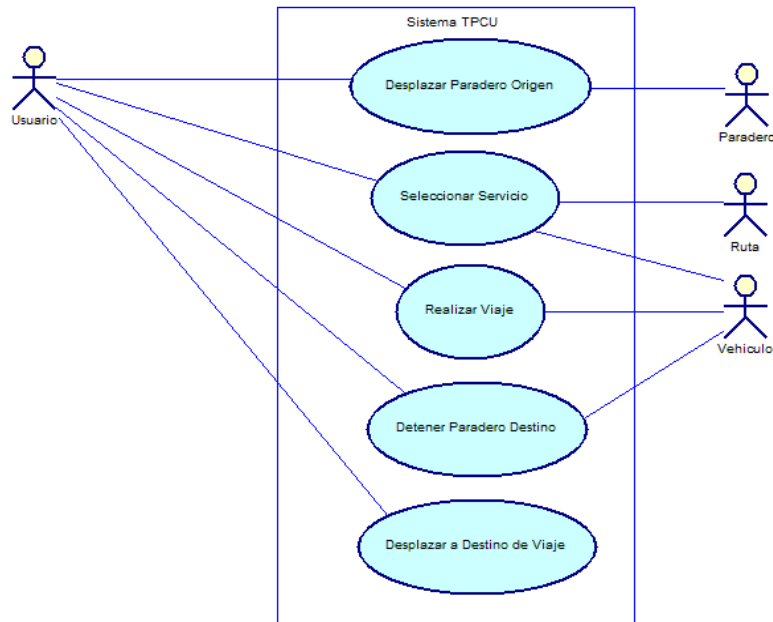
⁵⁷ LARMAN Cray Applying UML and Patterns. Ed. Prentice Hall. 2002.

⁵⁸ MEYER B., Construcción de Software Orientado a Objetos. Ed. Prentice-Hall. 1998.

⁵⁹ BRUEGGE, B. y DUTOIT, A.H. Ingeniería de Software Orientada a Objetos. México, Ed. Prentice Hall. 2002.

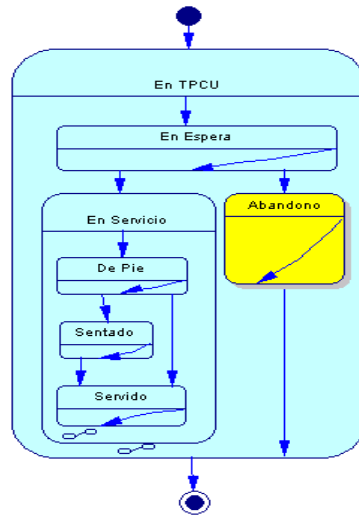
diagramas de casos de uso, se ve reflejada en la contextualización del problema y en la realización del análisis de los requisitos del sistema. (Figura 12).

Figura 12. Diagrama de caso de contexto para el sistema TPCU



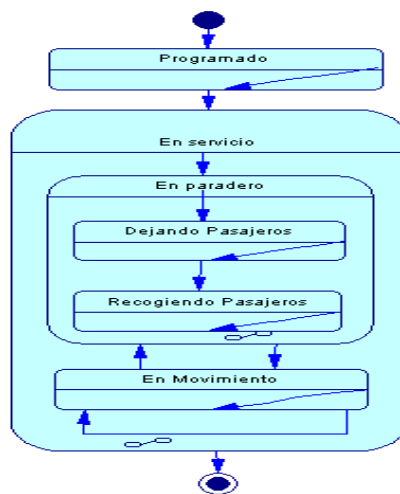
- **Diagramas de estado.** Estos diagramas permiten mostrar los diferentes estados y transiciones que posee un sistema en cada una de sus partes. En el caso del sistema TPCU se pueden analizar los siguientes diagramas:
 - Diagrama de estados del viaje: El usuario (viaje) presenta siete estados posibles durante el proceso: Inicialmente, el usuario ingresa al sistema “En TPCU”, e inicia un estado “En Espera”, luego, puede tomar uno de dos estados posibles, “En Servicio”, si usa el sistema o “Abandono”, si luego de esperar cierto tiempo decide no usar el sistema”; si lo usa, emprende el viaje y puede realizarlo de dos formas: “De Pie” y luego “Sentado” o puede ir “De Pie” todo el trayecto, hasta ser “Servido”. (Figura 13).

Figura 13. Diagrama de estados para un viaje en el sistema TPCU



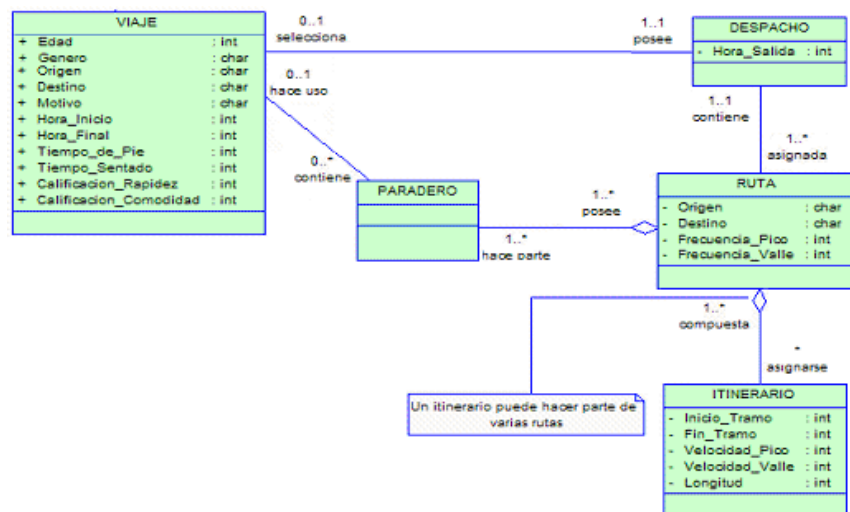
- Diagrama de estados del vehículo o despacho. Este diagrama presenta seis estados posibles para el agente despacho. Inicia con el estado “Programado”, es decir, decide trabajar ese día; pasa a un estado “En Servicio”, ya que, realiza un desplazamiento de un paradero origen a uno de destino; en varias ocasiones toma el estado “En Paradero”, allí puede cambiar a “Dejando Pasajeros” y “Recogiendo Pasajeros”, luego reanuda su marcha cambiando su estado a “En Movimiento” y esto se repite hasta que el despacho llega al paradero destino del itinerario. Esto se vislumbra en la figura 14.

Figura 14. Diagrama de estados de despacho (vehículo) en un sistema TPCU



- **Diagrama de clases.** El diagrama de clases permite obtener una visión estática del sistema TPCU, así como sus características y sus interrelaciones directas e indirectas. En un modelo para simulación es muy importante este tipo de diagramas, porque al crear las clases que intervienen en el sistema se puede determinar cada uno de los parámetros que lo componen, y a su vez puede darse la idea de los parámetros con los que se puede jugar en los diferentes escenarios que se deben crear para la simulación. En el diagrama de clases del sistema TPCU (Figura 15), la clase usuario debe asociarse de forma directa con las clases: Viaje, Vehículo, Paradero y de forma indirecta con las clases Ruta e Itinerario. El diagrama se interpreta de la siguiente manera:
 - Un Viaje, que representa a un usuario, puede hacer uso o no de un paradero y un paradero puede contener muchos pasajeros.
 - Un Viaje puede seleccionar o no un vehículo y un vehículo puede contener muchos Viajes.
 - Un paradero hace parte de una o muchas rutas y una ruta posee muchos paraderos.
 - Un despacho contiene una y solo una ruta, y una ruta que posee un origen, un destino, una frecuencia de salida en hora pico y una frecuencia de salida en hora valle, y es asignada a uno o varios despachos.
 - Una ruta está compuesta por uno o muchos itinerarios y un itinerario que posee un inicio de tramo, un final de tramo, una velocidad en hora pico, una velocidad en hora valle y una longitud, esta asignado a muchas rutas.

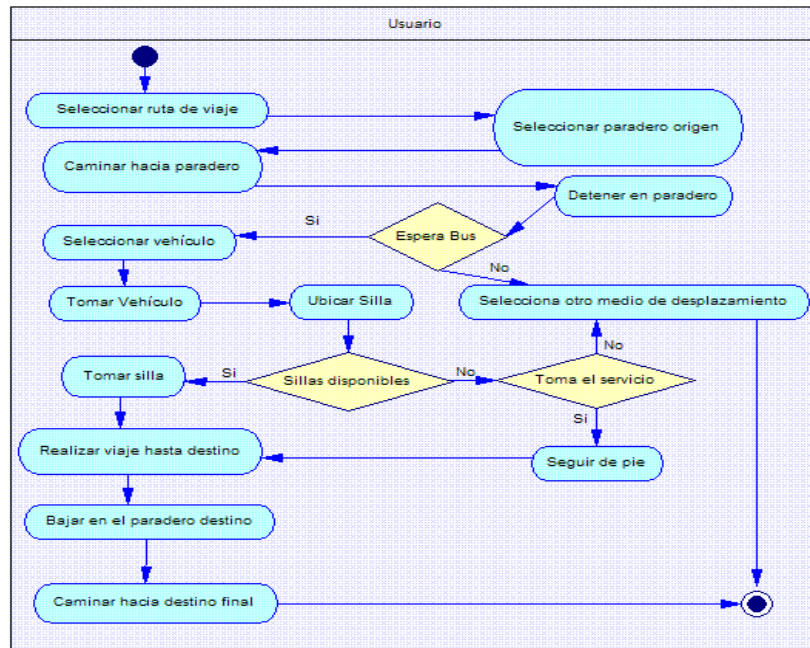
Figura 15. Diagrama de clases del sistema TPCU



Es importante destacar que los diferentes atributos de cada una de las clases, son tomados como parámetros cuando el modelo se esté implementando en el software de simulación. Es así que la persona que está simulando tendrá una serie de parámetros para programar un viaje, para programar una ruta con diferentes itinerarios, y otra serie de atributos con los cuales puede crear un número considerable de escenarios.

- **Diagramas de actividades.** Los diagramas de actividades, permiten mostrar las acciones que llevan a cabo los diferentes actores que participan dentro del sistema. Tales actividades se muestran de una forma secuencial y atemporal, característica que diferencian a estos diagramas con los de secuencia. La definición de las actividades para el sistema de servicio público colectivo urbano puede ser observada en la Figura 16.

Figura 16. Diagrama de actividades dentro de un sistema TPCU



Cuando se pretende simular un sistema basado en agentes, los diagramas que se crean son principalmente: los diagramas de casos de uso, cuyo fin es contextualizar y analizar el sistema que se está tratando; los diagrama de estados de los diferentes actores o agentes involucrados, que representarán el comportamiento de estos dentro del sistema; el diagrama de clases, que permite conocer las variables y parámetros asociados a los objetos activos que en el futuro serán agentes; y finalmente los diagramas de actividades, que muestran las diferentes tareas que realiza cada elemento dentro del sistema.

- **Especificación lógica de los agentes que interactúan con el sistema TPCU.** Las siguientes son las reglas de comportamiento de algunos de los componentes (agentes) del sistema TPCU.

Despacho

- **Si** el vehículo está programado **entonces** verifique hora de salida
 - **si** la hora de salida corresponde a la hora de programación del vehículo **entonces** dar salida al vehículo e iniciar contabilización del tiempo de recorrido.
si no espera.
- **Si** el vehículo llega a un paradero **entonces** detenerse
 - **Si** no siga en movimiento.
- **Si** el vehículo se detiene en paradero **entonces** esperar a que desciendan los pasajeros que traen como destino el paradero.
 - **si** un pasajero desciende **entonces** restar 1 al volumen de pasajeros que se están transportando en el momento en el vehículo y contabilizar la información estadística del pasajero
 - **si** un pasajero solicita servicio **entonces** adicionar 1 al volumen de pasajeros que se están transportando en el momento en el vehículo.
- **Si** el vehículo de detiene en paradero final **entonces** almacenar información estadística del viaje.
- **Si** el vehículo está en movimiento **entonces** ajuste la velocidad de desplazamiento de acuerdo con el tramo donde se desplace.

Paradero

- **Si** hora actual corresponde a periodo **entonces** generar viajes de acuerdo con la tasa de llegada y demás características
- **si no** modifique tasa de llegada respecto a periodo de tiempo del día.

Tramo

- **Si** está un vehículo en movimiento sobre un tramo determinado **entonces** verifique velocidad a la que se puede desplazar ese vehículo
 - **Si** la velocidad sobre pasa a la asignada a ese tramo **entonces** reduzca velocidad del vehículo.
- **Si** la hora actual es igual al límite superior del periodo del tramo **entonces** actualice la velocidad.

Viaje.

- **Si** esta en un paradero **entonces**
 - **Si** llega un despacho al paradero **entonces** verifica que haya cupo.
 - **Si** hay cupo **entonces** ascienda al vehículo.
 - **Si no** espere

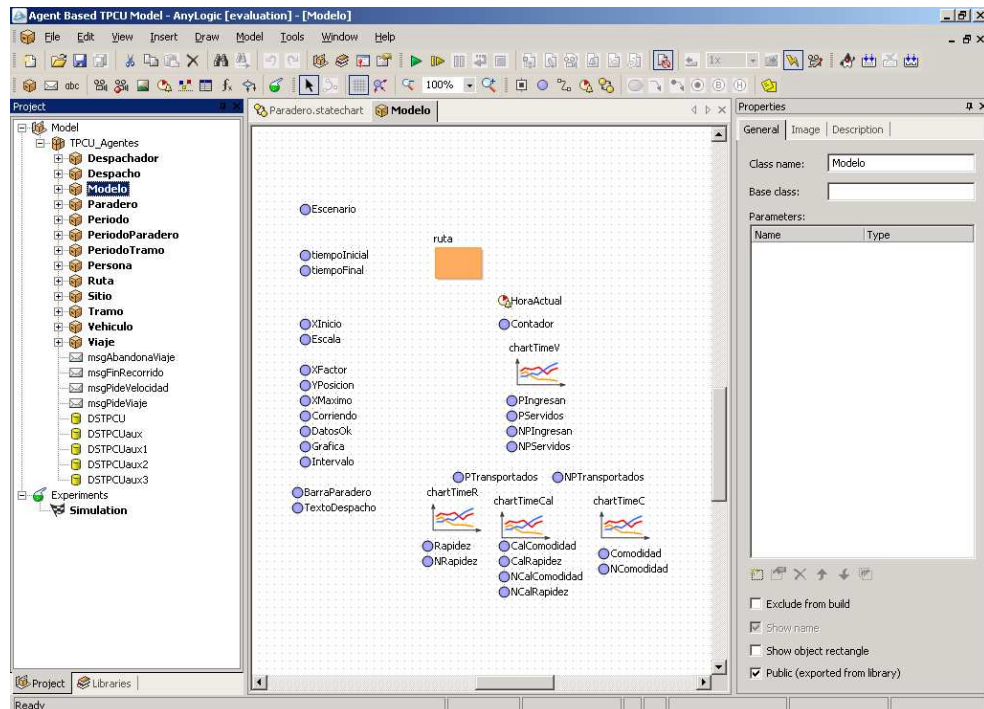
- Si la espera es mayor al tiempo destinado para esto **entonces** “abandona el sistema”.
 - Si no sigue esperando
- Si está en un despacho **entonces**:
 - Si el despacho llega a un paradero **entonces** verifique su destino.
 - Si es el destino **entonces** descienda.
 - Si no es el destino y esta de pie **entonces** busque sillas disponibles.
 - Si hay sillas **entonces** se sienta.

Ruta.

Si un despacho llega al Terminal de destino **entonces** contabilice la información del despacho.

4.2.1.2 Modelamiento del sistema. La implementación del modelo se presenta a partir de la figura 17, en la cual se observa la estructura de los elementos utilizados para este tipo de simulación.

Figura 17. Elementos implementados en el modelo microscópico



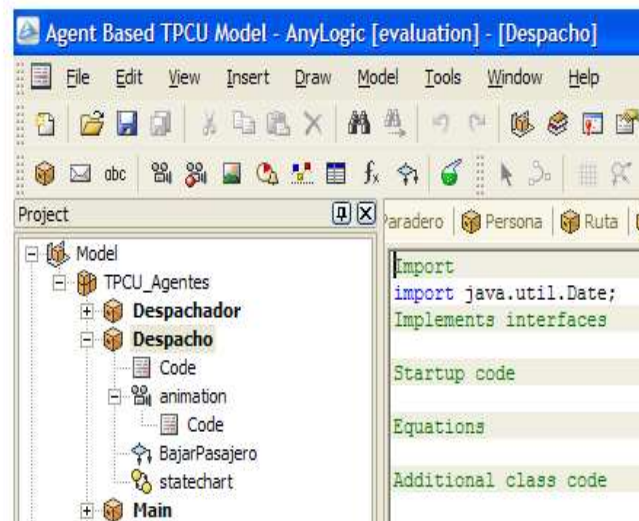
Como se plasma en la figura anterior (parte izquierda de la pantalla, área denominada *project*), se implementaron clases activas, entre los cuales se tienen: Despachador, Despacho, Paradero, PeriodoP, PeriodoT, Persona, Ruta, Sitio,

Tramo, Vehículo, Viaje, con su estructura propia, comportamiento y paso de mensajes; además se maneja la obtención de datos externos (DSTPCU, DSTPCUaux, DSTPCUaux1, DSTPCUaux2, DSTPCUaux3), los cuales permiten tener acceso a datos incluidos en una base de datos en MS-Access, que representan los diferentes escenarios con sus parámetros asociados y utilizados en la simulación.

La sección *Experiments - Simulation*, permite configurar el objeto principal (*Main*) que enlaza el llamado a los demás agentes.

Estructura interna de un agente en AnyLogic. En la figura 18 se observan los componentes internos de un agente, compuesto por las siguientes secciones: “code”, “animation”, “Algorithmic function”, “statechart”. Estas son las principales características que se pueden asociar a un agente en AnyLogic.

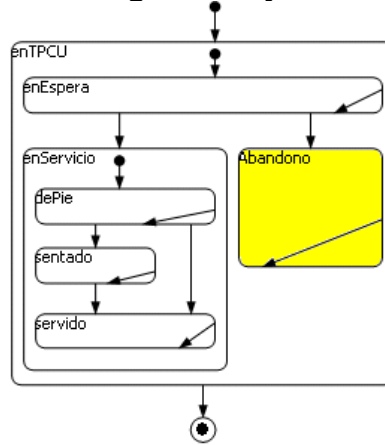
Figura 18. Características de los agentes en AnyLogic



En la anterior figura se observa la sección – code- parte izquierda y en la parte derecha a ésta, se puede observar que el código fuente que utiliza esta herramienta de simulación es Java.

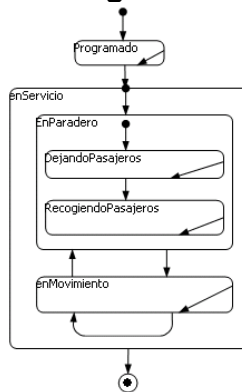
Diagramas de estados en AnyLogic. En la sección – statechart-, se configura el comportamiento de cada uno de los agentes que están involucrados en el modelo, allí se representan los diferentes estados y transiciones que pueden adoptar los agentes interactivos. En las figura 19, 20, 21 y 22, se observa la implementación del comportamiento (estados y transiciones) de los agentes: viaje, despacho, paradero y tramo respectivamente.

Figura 19. Diagramas de estado agente viaje



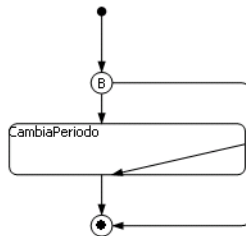
En la figura anterior se observa un estado de color amarillo (rectángulo con esquinas redondeadas), denominado “Abandono” al cual pasa el agente viaje cuando un despacho no atiende su petición dentro de un determinado límite de tiempo.

Figura 20. Diagramas de estado del agente despacho



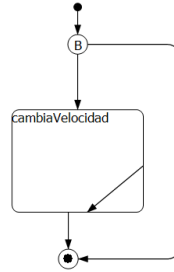
La figura anterior representa el comportamiento del agente “despacho”, el cual posee un estado inicial, estados intermedios y un estado final, dentro de cada uno de ellos se encuentran las diferentes transiciones (flechas) que representan los eventos de cambio que se dan en el comportamiento de dicho agente.

Figura 21. Diagramas de estado agente paradero



El agente paradero pasa por varios estados en el transcurso del día, el tiempo entre cambios son periodos caracterizados por diferentes comportamientos en la las tasas de generación de viajes.

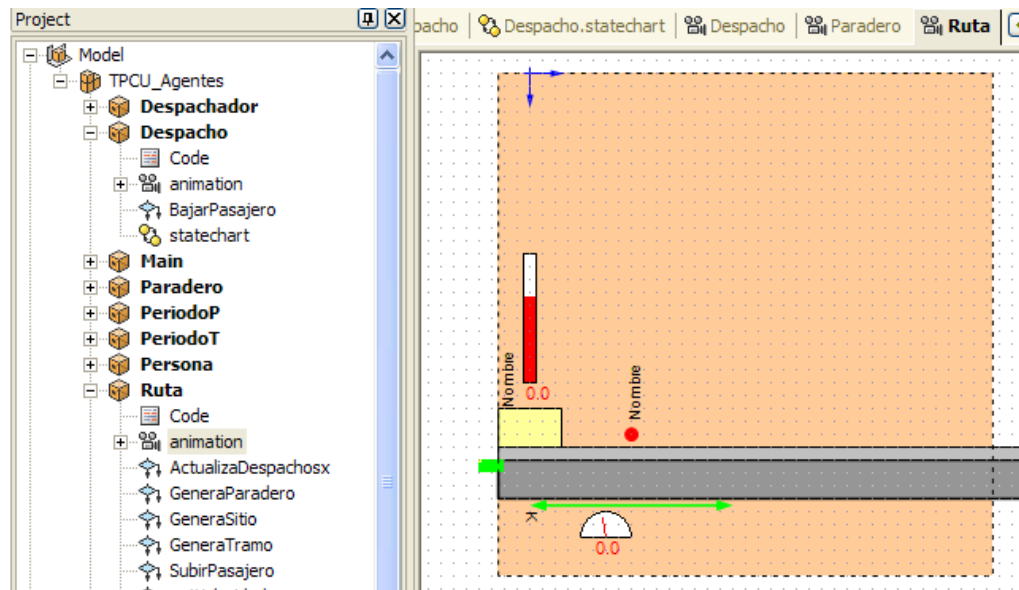
Figura 22. Diagramas de estado agente tramo



La vía sobre la cual transitan los vehículos que cumplen la ruta, esta dividida en segmentos que en el modelo son considerados como agentes, por que cada uno de ellos tiene sus características físicas y operativas, las cuales cambian en periodos de tiempo y para este modelo es de suma importancia la velocidad de cada tramo en cada periodo de tiempo del día.

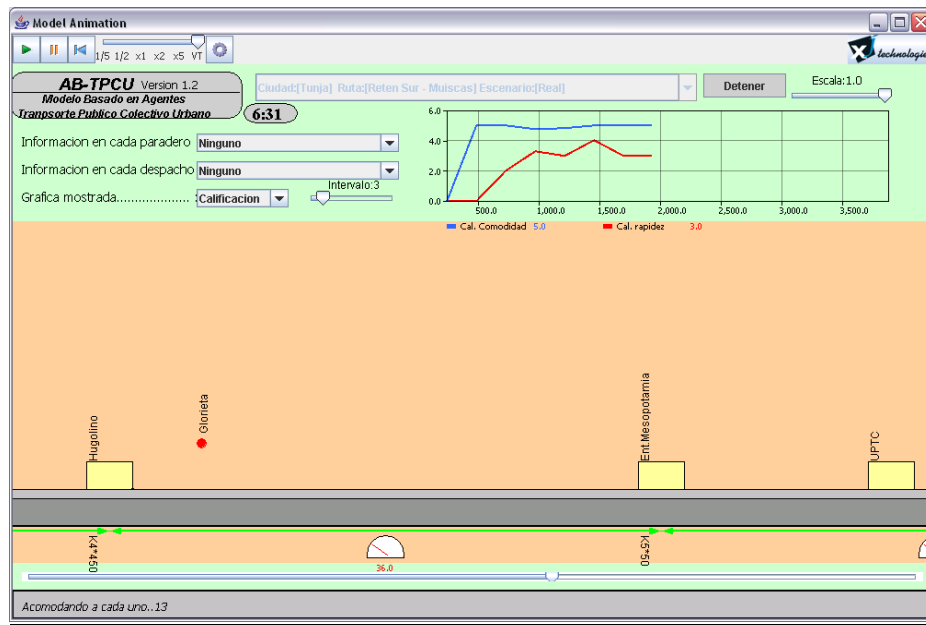
4.2.1.3 Crear la interfaz gráfica de usuario. En la sección –animation- se crea y configura la interfaz gráfica de usuario, en la que se muestra el comportamiento de los agentes en cuanto a desplazamientos y visualización de comportamientos, tal como se observa en la figura 23.

Figura 23. Animaciones en AnyLogic



La interfaz gráfica de usuario se puede apreciar en la Figura 24, la cual representa las diferentes áreas de simulación junto con sus componentes. Una descripción detallada se presenta en el Anexo E: “Manual de uso del software de simulación con agentes”.

Figura 24. Interfaz gráfica de usuario del simulador en agentes



4.2.1.4 Crear escenarios a experimentar. Para la creación de escenarios a experimentar se seleccionó la ciudad de Tunja, específicamente la ruta cubierta entre los barrios Reten Sur y Muiscas, que es una de las rutas más importantes que cubre la Ciudad de Sur a Norte, tomando como referencia datos del año 2003; y con el parque automotor con el que se ofreció el servicio.

La ruta cuenta con catorce paraderos y tiene una longitud total de 8.370 metros, distribuidos como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Distancia entre paraderos de la ruta Reten Sur – Muiscas

Nombre	Distancia (metros)
Reten Sur	0
Los Hongos	950
Comboy – Gaseos	700
Colegio Rosario	1400
K 9 Con CII 21	400
Nieves	450
Hugolino	550

Nombre	Distancia (metros)
Ent.Mesopotamia	600
UPTC	250
Ent. Santa Ines	350
Centro Norte	450
Toyota	550
Asis	950
Muiscas	770
TOTAL	8.370

Fuente: Autores, basados en datos del grupo de investigación GIDPOT.

Se toman como base de análisis, los datos obtenidos en el año 2003, en estudios realizados por el grupo GIDPOT, ya que no ha habido cambios importantes en las actividades socioeconómicas de la ciudad de Tunja, que afecten el comportamiento de la distribución de la generación y atracción de viajes para la ruta en estudio, ver tabla 7.

Tabla 7. Distribución de la generación y atracción de viajes.

Paradero Nombre	Generación de viajes (%)					Atracción Índice (%)
	Estudio	Ocio	Trabajo	Comercio	Hogar	
Barrio Reten Sur	0	5	15	30	50	0,0
Los Hongos	0	2	6	12	80	1,4
Comboy–Gaseosas	25	5	10	20	40	2,8
K 12 Calle 18	10	10	35	30	15	5,6
Colegio Rosario	35	10	20	30	5	7,0
K 9 Con Cll 21	30	10	20	35	15	7,0
Nieves	25	15	10	20	30	5,6
Hugolino	15	10	10	25	40	4,2
Glorieta	15	25	5	20	35	1,4
Ent. Mesopotamia	5	15	5	10	65	4,2
UPTC	75	5	10	5	5	19,7
Ent. Santa Inés	5	10	5	5	75	4,2
Centro Norte	5	25	10	50	10	4,2
Toyota	5	20	10	60	10	1,4
Asís	5	5	5	5	80	5,6
Entrada Muiscas	0	5	5	5	85	11,3
Barrio Muiscas	55	10	5	5	25	14,1

Fuente: Autores.

- **Escenario datos reales:** se tomó la programación de la ruta para un día hábil crítico, el cual en la ciudad de Tunja es el viernes, ya que en este día se incrementan las actividades; los datos tomados para éste escenario son los que en la actualidad se implementan en el sistema TPCU de la ciudad de

Tunja. La información de los parámetros base de simulación, se observan en la tabla 8; la información de los vehículos y hora asignada para su despacho, es la suministrada por la empresa “Transportes Los Muiscas S.A”, que es una de las empresas que atiende esta ruta.

Tabla 8. Escenario de simulación base (datos reales).

PARAMETRO	VALOR PARAMETRO
Ruta	Reten Sur – Muiscas
Día	Viernes
Hora	6:00 a.m. a 10:00 p.m.
Número de Vehículos	27 Buses
Despachos en el día	97 Despachos/Día
Capacidad vehicular utilizada día	3100 Viajes
Capacidad vehicular máxima día	3350 Viajes
Intervalo de tiempo de envío de despachos	15 minutos hora valle 5' minutos hora pico

Fuente: Grupo GIDPOT

La distribución y asignación de la programación, de los escenarios: Real, Alterno, Alterno 1, Alterna 2, Alterna 3, de la ruta en estudio, se encuentra almacenada en la base de datos de parámetros y se puede observar en la consulta “CProgramación”.

Escenarios alternos: El parámetro cambiante, en los nuevos escenarios: Alterno, Alterno 1, Alterno 2, Alterno 3, es “Intervalo de tiempo de envío de despachos”, como se aprecia en la tabla 9:

Tabla 9. Escenarios y distribuciones de tiempo

Escenario	Numero de intervalos	Tiempo en minutos periodo valle	Tiempo en minutos periodo pico
Alterno	9	17,5	4
Alterno 1	1	10	10
Alterno 2	9	30	3
Alterno 3	9	13	5,5

4.2.1.5 Simular los modelos con un software. El software utilizado fue la herramienta AnyLogic Versión 5.5 Trial, con este software se simula en primera instancia el modelo con el escenario real (varias veces) y posteriormente se ejecutan varias simulaciones para cada uno de los otros escenarios. Los datos obtenidos se observan en la tabla 10

Tabla 10. Resultados de las diferentes ejecuciones del modelo

Programación	IdSimulacion	Calificación Comodidad	Calificación Rapidez	Viajes Diarios Generados	Viajes Diarios Servidos	Viajes Desertados	Tiempo Total De Espera
Real	0	3,75339367	2,51066581	4024	3094	930	9447
Real	1	3,70138889	2,48484849	4080	3168	911	9224
Real	2	3,73017378	2,49131122	4158	3165	993	10077
Real	3	3,79244074	2,55221009	4061	3122	937	9497
Real	4	3,73113208	2,46855346	4119	3180	938	9472
Real	5	3,74639046	2,52008788	4129	3186	942	9485
Alterno	0	3,76529517	2,47048301	4068	2795	1273	12904
Alterno	1	3,76421886	2,46364291	4038	2778	1260	12740
Alterno	2	3,73265592	2,45865452	4131	2854	1275	12925
Alterno 1	0	3,69901622	2,53443233	4021	3761	257	2544
Alterno 1	1	3,69370331	2,5317502	4013	3748	264	2611
Alterno 1	2	3,69547872	2,53776596	4026	3760	264	2609
Alterno 1	3	3,70732998	2,53559143	4040	3779	261	2582
Alterno 2	0	3,84995252	2,50617284	4051	2106	1945	19813
Alterno 2	1	3,84222846	2,46910112	4068	2136	1931	19658
Alterno 2	2	3,87312349	2,51428571	4009	2065	1943	19759
Alterno 2	3	3,81621112	2,45051838	4065	2122	1943	19774
Alterno 2	4	3,82962963	2,51296296	4108	2160	1947	19771
Alterno 2	5	3,85973905	2,52749301	4072	2146	1925	19632
Alterno 3	0	3,71083987	2,47689629	4089	3441	646	6478
Alterno 3	1	3,71279004	2,49830221	4157	3534	621	6214
Alterno 3	2	3,70439139	2,46389626	4056	3393	663	6641

4.2.1.6 Obtener resultados. En la tabla 11 se muestra los resultados obtenidos y almacenados en la base de datos de información de los simuladores en agentes y dinámica de sistemas:

Tabla 11. Resultados de la simulación con el modelo basado en agentes

Programación	Viajes Diarios Generados	Viajes Diarios Servidos	Viajes Desertados	Calificación Comodidad	Calificación Rapidez
Real	4095	3152	942	3,74	2,50
Alterna	4079	2809	1269	3,75	2,46
Alterna 1	4026	3761	264	3,70	2,54
Alterna 2	4062	2122	1939	3,85	2,50
Alterna 3	4101	3456	643	3,71	2,48

Fuente: Base de datos información simuladores agentes y dinámica de sistemas (Consulta CResultados)

Los resultados promedio (condensando la información generada en un día por el sistema TPCU, **para cada escenario**) por cada una de las variables de análisis fueron:

Escenario Real

Nivel de servicio en cuanto a comodidad:	3,74
Nivel de servicio en cuanto a rapidez:	2,50
Calificación Definitiva del servicio:	3,12

Con la obtención de los datos anteriores se puede concluir que la calidad de servicio prestada por el sistema TPCU es **REGULAR**.

Por otro lado se observa la consistencia entre los datos extraídos de manera manual de los estudios llevados a cabo por el Grupo GIDPOT y el modelo desarrollado en esta investigación.

4.2.2 Simulación Macroscópica. El modelado macroscópico fue realizado con dinámica de sistemas. Se utilizaron etapas de las metodologías propuestas por Jay Forrester y Javier Aracil, ya que permiten trabajar la realimentación en sistemas sociales. Estas etapas son:

- 4.2.2.1 Definición del problema
- 4.2.2.2 Conceptualización del sistema
- 4.2.2.3 Formalización
- 4.2.2.4 Comportamiento del modelo
- 4.2.2.5 Evaluación del modelo.
- 4.2.2.6 Explotación del modelo.

A continuación se presenta una breve descripción de la aplicación de la metodología en cada una de sus fases.

4.2.2.1 Definición del problema. El TPCU se considera un servicio público y como tal debe tener una cobertura amplia, ofreciendo una calidad del servicio adecuada. Si la calidad de servicio percibida por los usuarios no es satisfactoria, estos tenderán a abandonar el sistema, lo que le representa al estado un mayor costo económico y social además de las implicaciones ambientales que trae consigo un crecimiento en el transporte particular. Además en la actualidad las ciudades pequeñas e intermedias, como en el caso de Tunja, no cuenta con una herramienta computacional que permita evaluar el efecto en la calidad del servicio (en cuanto a la comodidad y rapidez), ni existe herramienta alguna que permita simular el comportamiento de esta situación con el fin de presentar alternativas de solución a las actuaciones anómalas que se presentan en cuanto a la prestación de este servicio.

A continuación se identifican los elementos componentes del sistema, con el fin de dar una solución al problema planteado anteriormente, para ello se pretende simular el comportamiento de un sistema TPCU, que reaccione al modificar los

despachos establecidos para una ruta y así poder evaluar como la calidad del servicio en cuanto a la rapidez y comodidad varia, para con esto encontrar cual de las situaciones simuladas es la adecuada para que el usuario del TPCU evalúe con aceptación la calidad en la prestación del servicio sin deteriorar la cobertura.

El periodo a simular es de treinta días, ya que este es el tiempo que las empresas de transporte en la ciudad de Tunja, normalmente utilizan para el ajuste de sus programaciones (distribución de despachos en el día), este mismo periodo de tiempo lo tienen establecido para llevar a cabo su planeación del uso del parque automotor con el fin de dar una asignación equitativa a cada uno de sus afiliados (propietarios de vehículos).

Para lograr una descripción del sistema en elementos que son susceptibles de estudiar y que intervienen en el problema de la programación de la operación del TPCU, desde el punto de vista macroscópico en el espacio y en el tiempo, se identificaron los siguientes elementos:

- Demanda: Los elementos relacionados con la demanda del servicio están caracterizados principalmente por los viajes de personas (Recorrido que realiza una sola persona en un vehículo desde un punto de origen a uno de destino), los cuales son creados en los polos de generación de viajes que son cubiertos por la ruta de TPCU en estudio. Se identifican los siguientes factores.
 - viajes potenciales: Número de viajes que se generan para la ruta en cuestión en un periodo de tiempo dado. (Unidad de medida = Viajes)
 - viajes servidos: Número de viajes que son atendidos dentro del sistema TPCU. (Unidad de medida = Viajes)
 - viajes generados en un periodo: Número de viajes que se generan en la Ciudad, para la ruta en estudio, en un periodo de tiempo determinado. (Unidad de medida = Viajes/día)
 - viajes calidad aceptable: Viajes que son evaluados con un nivel de calidad superior a 3.0. (Unidad de medida = Viajes/día)
 - viajes calidad inaceptable: Viajes que fueron evaluados con un nivel de calidad inferior a 3.0. (Unidad de medida = Viajes/día)
 - nuevos viajes: proporción de viajes que se generan en un periodo de tiempo dado y que incrementan los viajes potenciales. (Unidad de medida = Viajes/día)
 - incapacidad servicio. Proporción de viajes que por razones de déficit en la oferta de servicio no son atendidos. (Unidad de medida = Viajes/día)
 - desercion: Numero de viajes que por la incapacidad en el servicio no son atendidos y/o son atendidos de manera inadecuada, es decir con baja calidad en el servicio prestado. (Unidad de medida = Viajes)

- retorno. Proporción de viajes que con posterioridad a la deserción del sistema vuelven hacer uso de éste. Se considera que el retorno de viajes se lleva a cabo cada 2 unidades de tiempo. (Unidad de medida = Viajes/día)
 - calidad: Promedio de la evaluación dada a la comodidad del viaje y a la rapidez del mismo; formulada por los usuarios del sistema en un tiempo determinado. (Unidad de medida = Sin dimensión)
 - tabla evaluación microscópica: medida de la calidad resultante de la simulación microscópica. (Unidad de medida = Sin dimensión)
 - tasa generación viajes: Porcentaje de nuevos viajes que se generan en el periodo de tiempo dado. Asociado a las características de crecimiento de la población de la ciudad y a cambios de carácter permanente relacionados con las actividades que desarrollan sus habitantes. (Unidad de medida = 1/día)
 - tasa retorno: Es la tasa de viajes que regresan al TPCU al cabo de algún tiempo. (Unidad de medida = 1/día)
 - tasa deserción: Tasa de viajes que abandonan definitivamente el sistema TPCU. (Unidad de medida = 1/día)
 - abandono definitivo: Viajes que abandonan definitivamente el sistema TPCU. (Unidad de medida = Viajes/día)
- Oferta: La oferta del servicio TPCU, está conformada por diversos elementos que intervienen en la operación y afectan el comportamiento del sistema. Entre estos esta:
 - despacho: Numero de despachos (recorridos) por unidad de tiempo asignados a la ruta en estudio, tomado de la simulación microscópica. (Unidad de medida = Despacho/día)
 - capacidad despacho: Promedio de la cantidad máxima de pasajeros que puede transportar un vehículo en un despacho, generado por la simulación microscópica. (Unidad de medida = Viajes/Despacho)
 - viajes despachados: Numero máximo de viajes que la ruta esta en capacidad de atender. (Unidad de medida = Viajes/día)
 - nivel de servicio: Calidad de servicio que se proporciona a los usuarios del sistema TPCU en un momento dado, evaluada como se representa en la tabla 12.

Tabla 12. Rangos de calificación cuantitativa y cualitativa del nivel de servicio.

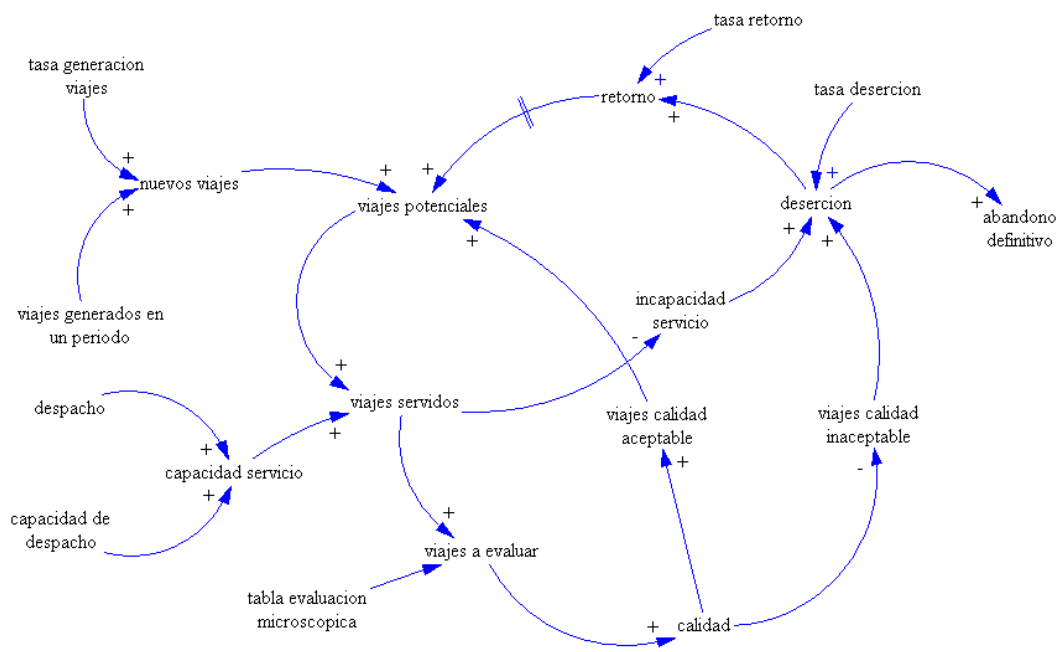
Rango	Calificación Cuantitativa	Calificación Cualitativa
> 4.5	5	Excelente
3.5 - 4.5	4	Buena

2.5 - 3.4	3	Regular
1.5 - 2.4	2	Mala
0.5 - 1.4	1	Pésima
< 0.5	-	Inaceptable

Fuente: Grupo de investigación GIDPOT

4.2.2.2 Conceptualización del sistema. En esta fase se definieron los distintos elementos que integran la descripción del problema y se plantean las influencias que se producen entre ellos. Esto se resume en la generación del diagrama de influencias, ver Figura 25.

Figura 25. Diagrama de influencias



Descripción de ciclos causales del sistema TPCU. En la figura anterior se representan los elementos del sistema y la forma como influyen o se afectan entre si. A continuación se describen los principales ciclos de realimentación causal identificados que intervienen en el comportamiento del sistema.

Los viajes potenciales, tienen un crecimiento permanente, por causas naturales del crecimiento de la población de las ciudades, por el crecimiento de la actividad económica de las ciudades, y por la generación de problemas de infraestructura y urbanismo, que hace que usuarios de otros medios de transporte recurran a él para su movilización dentro de la ciudad.

Para efectos del modelo se considera la **capacidad servicio** como constante, por que en la práctica es lo que realmente sucede, las empresas ajustan los volúmenes y tipos de su parque automotor para periodos del orden de meses o años, y por consiguiente las frecuencias en los despachos, esto con previa autorización o exigencia de las entidades reguladoras.

La **calidad** del servicio, en lo concerniente a rapidez y comodidad en el desplazamiento, es inversamente proporcional al volumen de usuarios potenciales diarios del sistema, es decir, que en la medida que crece la demanda del servicio, por la generación periódica de nuevos viajes y el eventual retorno de usuarios que habían abandonado el sistema, la calidad del mismo se reduce, dado que la capacidad ofrecida permanece constante; el sistema se autorregula con la deserción de usuarios del sistema TPCU a otros modos o medios de transporte como el transporte publico individual o el transporte particular, cuando los usuarios no se sienten satisfechos con la calidad de servicio que perciben, esto reduce la demanda del servicio y en consecuencia la calidad del servicio mejora para los usuarios que permanecen en el sistema, al incrementarse la calidad del servicio los usuarios tienden a permanecer en el sistema que lo hace atractivo para nuevos usuarios y para los usuarios de otros medios, este comportamiento se desarrolla hasta que el sistema encuentra un punto de equilibrio donde la calidad del servicio tiene un nivel de aceptación por parte de los usuarios.

La **deserción** de usuarios del TPCU a otros medios, se ve afectada por una fracción de los usuarios que no son atendidos en un día y los usuarios que habiendo sido servidos no quedan satisfechos con la calidad del servicio con la que fueron atendidos, deciden utilizar otros medios de transporte; de estos usuarios una fracción de ellos tienden a retornar al sistema después de un tiempo, una vez que han ajustado el horario de sus actividades a la oferta del servicio, o cuando reciben referencias de alguna mejora en la calidad del servicio; este fenómeno se refleja en el modelo como una relación causal con demora.

4.2.2.3 Formalización. En esta fase se convierte el diagrama de influencias, alcanzado en la etapa anterior, en diagrama de Forrester o de flujo - nivel. El cual corresponde al modelo a simular. En la Figura 26, se muestra el modelo desarrollado en Vensim y en la Figura 27 se observa su implementación en AnyLogic (herramienta de simulación base de este estudio).

Figura 26. Diagramas de Flujo – Nivel en Vensim

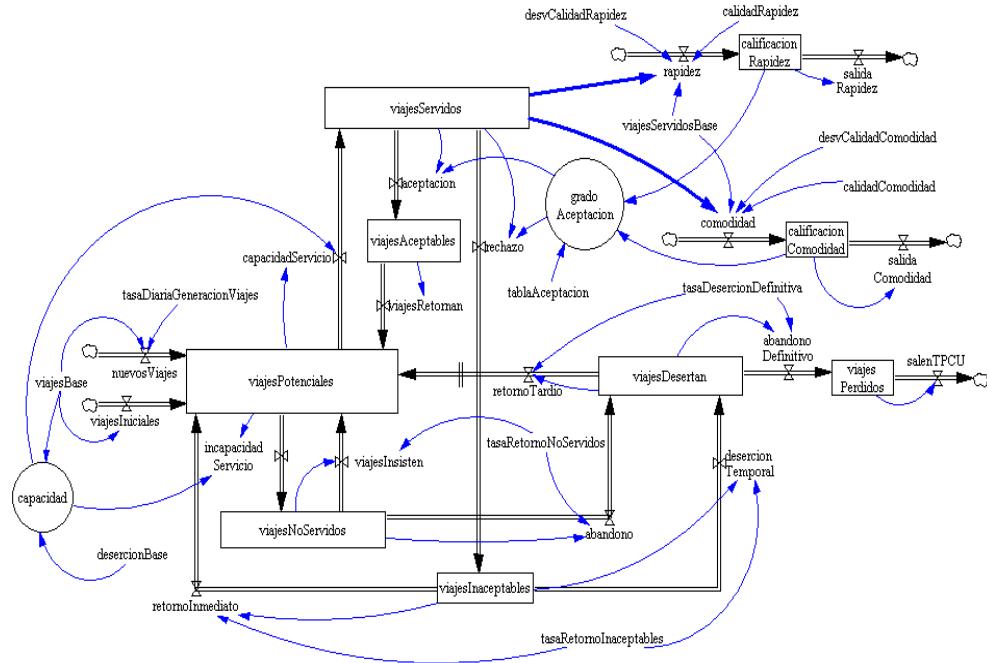
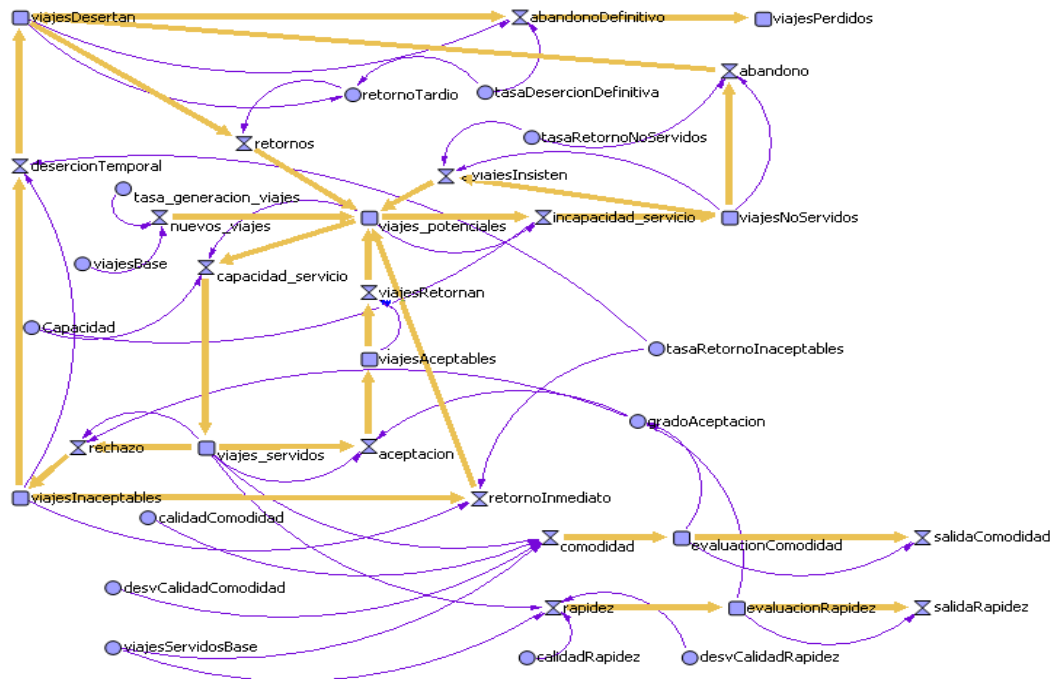


Figura 27. Diagramas de Flujo – Nivel en AnyLogic



En la figura anterior se observa el diagrama de flujo de nivel que se implemento en la herramienta AnyLogic y que permite llevar a cabo el análisis macroscópico del sistema TPCU, los elementos que integran el modelo son propios de la herramienta

y se acercan a la representación gráfica de los diagramas de Forrester generados por Vensim.

Ecuaciones relacionadas con el diagrama de flujo nivel. Observar la tabla 13

Tabla 13. Formalización del sistema TPCU.

Tipo	Nombre de Variable	Unidad medida	Fórmula
Flujo	nuevos_viajes	Viajes/día	tasa_generacion_viajes*viajesBase
Flujo	capacidad_servicio	Viajes/día	viajes_potenciales*Capacidad
Flujo	retornos	Viajes/día	delay(retornoTardio,1.0)
Flujo	incapacidad_servicio	Viajes/día	viajes_potenciales*(1-Capacidad)
Flujo	Aceptación	Viajes/día	viajes_servidos*gradoAceptacion
Flujo	rechazo	Viajes/día	viajes_servidos*(1-gradoAceptacion)
Flujo	abandonoDefinitivo	Viajes/día	viajesDesertan*tasaDesercionDefinitiva
Flujo	abandono	Viajes/día	viajesNoServidos*(1-tasaRetornoNoServidos)
Flujo	viajesInsisten	Viajes/día	viajesNoServidos * tasaRetornoNoServidos
Flujo	desercionTemporal	Viajes/día	viajesInaceptables*(1-tasaRetornoInaceptables)
Flujo	viajesRetornan	Viajes/día	viajesAceptables
Flujo	retornoInmediato	Viajes/día	tasaRetornoInaceptables * viajesInaceptables
Flujo	Comodidad	Sin dimensión	normal(desvCalidadComodidad, calidadComodidad / viajes_servidos * viajesServidosBase)
Flujo	Rapidez	Sin dimensión	normal(desvCalidadRapidez, calidadRapidez/viajes_servidos* viajesServidosBase)
Flujo	salidaComodidad	Viajes/día	evaluacionComodidad
Flujo	salidaRapidez	Viajes/día	evaluacionRapidez
Nivel	viajes_potenciales	Viajes	$d(\text{viajes_potenciales})/dt = \text{nuevos_viajes} + \text{retornos} - \text{capacidad_servicio} - \text{incapacidad_servicio} + \text{viajesRetornan} + \text{tasaRetorno} + \text{retornoInmediato}$
Nivel	viajes_servidos	Viajes	$d(\text{viajes_servidos})/dt = \text{capacidad_servicio} - \text{aceptacion} - \text{rechazo}$
Nivel	viajesDesertan	Viajes	$d(\text{viajesDesertan})/dt = + \text{abandono} - \text{abandonoDefinitivo} - \text{retornos} + \text{desercionTemporal}$
Nivel	evaluacionRapidez	Sin dimensión	$d(\text{evaluacionRapidez})/dt = \text{rapidez} - \text{salidaRapidez}$
Nivel	evaluacionComodidad	Sin dimensión	$d(\text{evaluacionComodidad})/dt = \text{comodidad} - \text{salidaComodidad}$
Nivel	viajesPerdidos	Viajes	$d(\text{viajesPerdidos})/dt = \text{abandonoDefinitivo}$
Nivel	viajesInaceptables	Viajes	$d(\text{viajesInaceptables})/dt = \text{rechazo} - \text{desercionTemporal} - \text{retornoInmediato}$
Nivel	viajesAceptables	Viajes	$d(\text{viajesAceptables})/dt = \text{aceptación} - \text{viajesRetornan}$

Nivel	viajesNoServidos	Viajes	$d(\text{viajesNoServidos})/dt = \text{incapacidad_servicio} - \text{tasaRetorno-abandono}$
Parámetro	desercionBase	Viajes/día	Valores obtenidos del modelo microscópico
Parámetro	viajesServidosBase	Viajes/día	Valores obtenidos del modelo microscópico
Parámetro	desvDesercionBase	Sin dimensión	Valores obtenidos del modelo microscópico
Parámetro	desvViajesServidosBase	Sin dimensión	Valores obtenidos del modelo microscópico
Parámetro	desvViajesBase	Sin dimensión	Valores obtenidos del modelo microscópico
Parámetro	calidadComodidad	Sin dimensión	Valores obtenidos del modelo microscópico
Parámetro	desvCalidadComodidad	Sin dimensión	Valores obtenidos del modelo microscópico
Parámetro	calidadRapidez	Sin dimensión	Valores obtenidos del modelo microscópico
Parámetro	desvCalidadRapidez	Sin dimensión	Valores obtenidos del modelo microscópico
Variable Auxiliar o	viajes base	Viajes	Valores obtenidos del modelo microscópico
Variable Auxiliar	tasa generacion viajes	1/día	0.002
Variable Auxiliar	tasaRetornoInaceptables	1/día	0.80
Variable Auxiliar	tasaDesercionDefinitiva	1/día	0.01
Variable Auxiliar	tasaRetornoNoServidos	1/día	0.95
Variable Auxiliar	retornoTardio	Viajes	$\text{viajesDesertan} * (1 - \text{tasaDesercionDefinitiva})$
Variable Auxiliar	gradoAceptacion	Sin dimensión	$\text{tablaAceptacion}((\text{evaluacionComodidad} + \text{evaluacionRapidez})/2)$
Variable Auxiliar	capacidad	Viajes	$\text{viajesBase} * 1.0 / (\text{viajesBase} + \text{desercionBase})$

Fuente: Autores.

4.2.2.4 Comportamiento del modelo. La simulación informática del modelo para determinar las trayectorias que genera, fue implementada en AnyLogic. Las áreas de trabajo que componen el simulador, su funcionamiento y manejo se encuentran documentadas en el Anexo F. Manual de uso del software de simulación con dinámica.

Debido a los cambios en la estructura de la ciudad, dado por el crecimiento mismo de la población, y creación y modificación de los polos de generación y atracción de viajes, las entidades gubernamentales que vigilan y controlan el transporte

público colectivo urbano, deben realizar ajustes a la planeación operativa en periodos no mayores a seis mese; razón por la cual este será el horizonte de simulación.

Al analizar el comportamiento del sistema, se aprecia el efecto de la calidad del servicio en la cobertura, al ser la calidad del servicio baja, los viajes potenciales se reducen debido a la deserción de usuarios a otros sistemas de transporte. En la medida que los usuarios abandonan el sistema y la oferta se mantiene constante, la calidad del servicio aumenta hasta un punto de aceptación por los usuarios y se logra un equilibrio en el que los volúmenes de deserción se aproximan al número de ingreso de nuevos usuarios al sistema TPCU.

Esta medida de calidad no se puede considerar como óptima, ya que la cobertura del sistema se ha reducido; para lograr una medida de calidad satisfactoria se debe modificar el escenario, con una programación de la operación tal que aumente la oferta y se logre una cobertura lo suficientemente razonable para la prestación de este servicio.

En las figuras 28 a 32 se observa que la tendencia del comportamiento de la calidad del servicio percibidos por los usuarios disminuye en la medida en que aumenta la cantidad de viajes servidos,

Figura 28. Comportamiento del modelo con la programación real

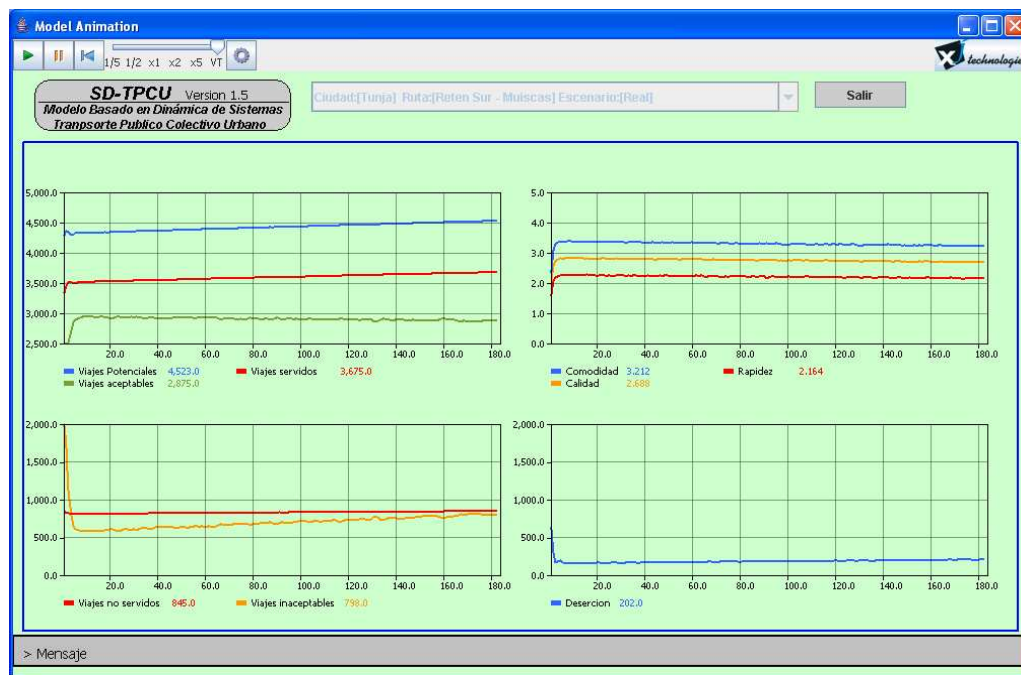


Figura 29. Comportamiento del modelo con la programación Alterna

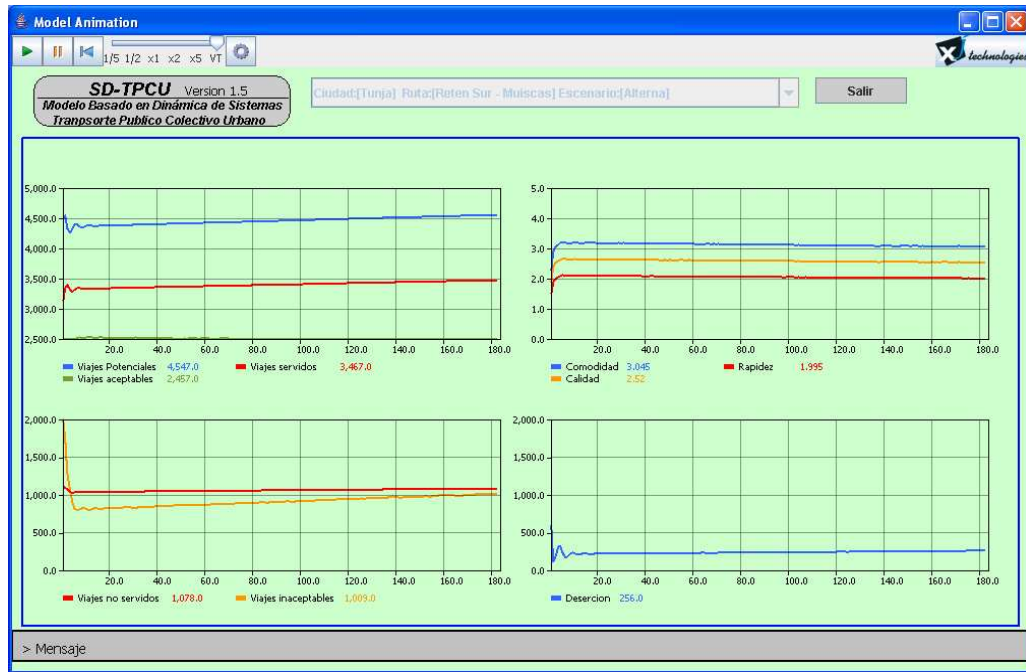


Figura 30. Comportamiento del modelo con la programación Alterna 1

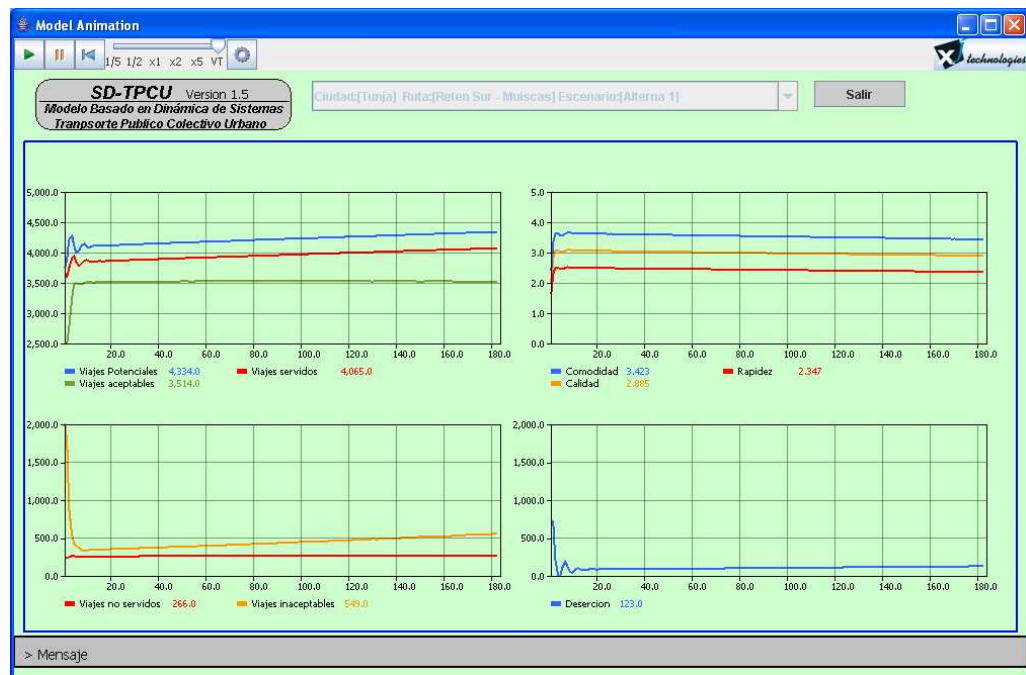


Figura 31. Comportamiento del modelo con la programación Alterna 2

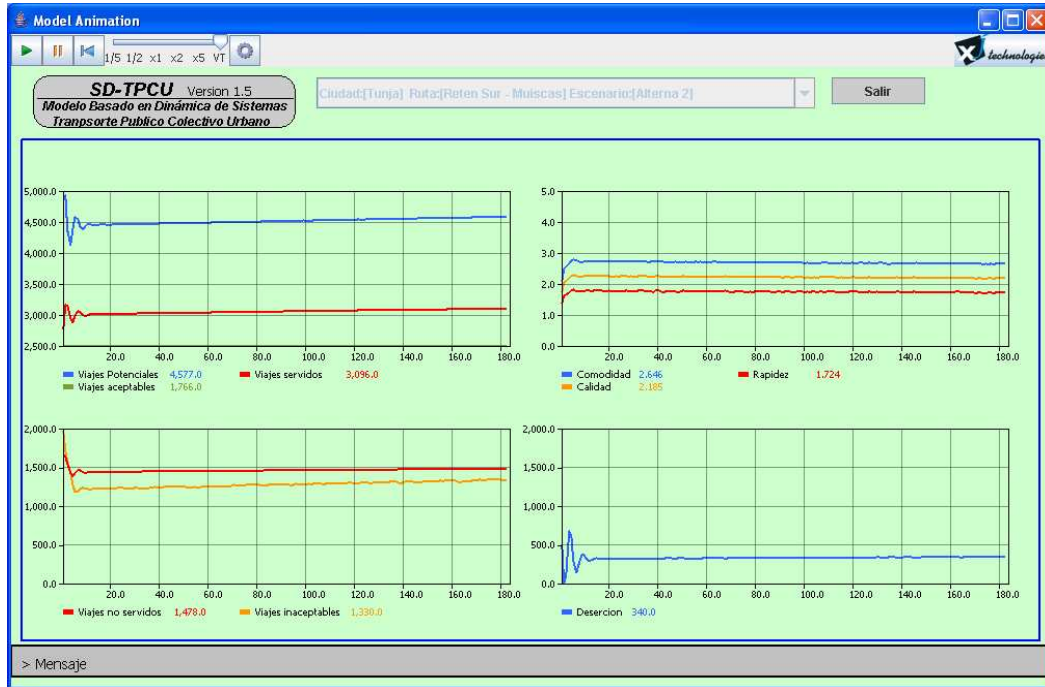
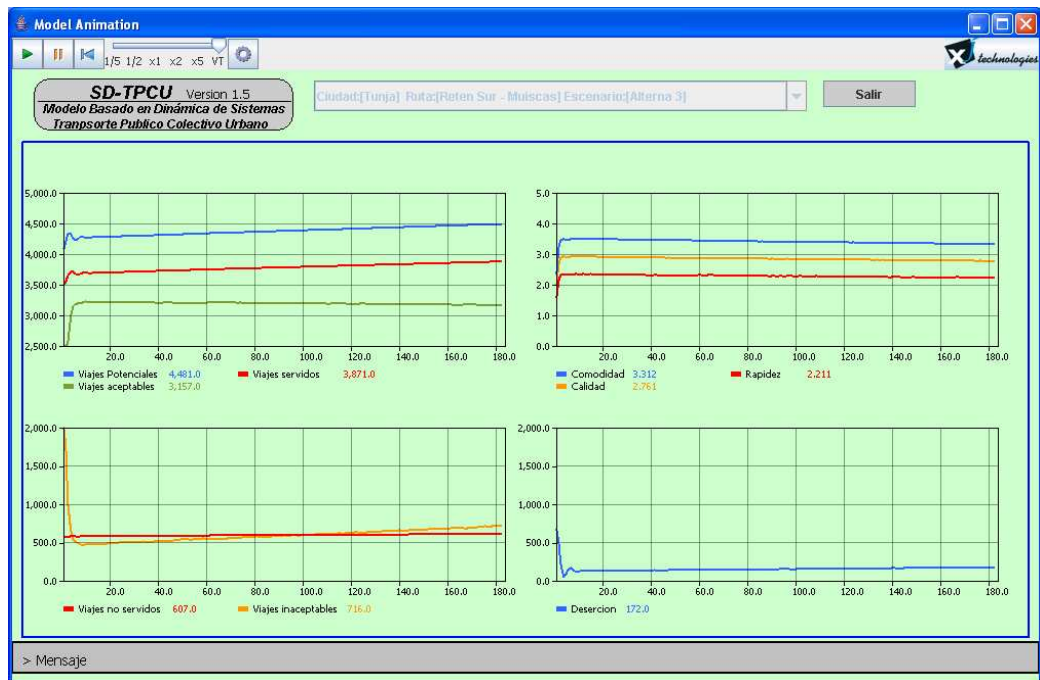


Figura 32. Comportamiento del modelo con la programación Alterna 3



4.2.2.5 Evaluación del modelo. Con los resultados obtenidos en el modelo microscópico basado en agentes, se realiza la simulación macroscópica, con dinámica de sistemas. Se contrastan estos resultados con las proyecciones hechas por especialistas, quienes plantean que los resultados obtenidos en los diferentes estudios muestran un comportamiento estable, mientras que no haya cambios radicales en la infraestructura vial, sólo presentando incrementos continuos asociados a las características del crecimiento de la población

4.2.2.6 Explotación del modelo. Esta última fase se emplea para analizar políticas alternativas que pueden aplicarse al sistema TPCU, siendo una herramienta útil para los analistas de la planeación operativa del transporte en la Ciudad de Tunja. No siendo el objeto de esta investigación, profundizar en estos análisis.

4.3 USO DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN.

En esta sección se muestra el procedimiento para la instalación y manipulación de los simuladores basados en las dos técnicas de las que trata el proyecto. En primera instancia se describe la forma en que se debe instalar el software para posteriormente ser utilizado; luego se describe la forma en que se debe operar el simulador con agentes y posteriormente se describe la forma de manejar el simulador con dinámica de sistemas.

4.3.1 Instalación y ejecución. Para la instalación de los simuladores se deben seguir los pasos comentados en el Anexo D.

4.3.2 Manual del simulador con agentes. En el Anexo E, se describen las áreas que integran la pantalla del simulador, además de los principales elementos que lo componen y se explica mediante un ejemplo el simulador en funcionamiento.

4.3.3 Manual del simulador con dinámica de sistemas. En el Anexo F, se muestra la forma en la que se debe manipular el simulador basado en dinámica de sistemas y que permite realizar el análisis macroscópico del problema. En éste se muestran las principales áreas que componen la interfaz del simulador, y se muestra una descripción detallada del simulador en ejecución.

Lo relacionado en esta sección permitirá la operación óptima de los dos simuladores por parte de la persona encargada de manejar la planeación operativa del transporte público colectivo urbano y la forma en que puede incluir nuevos escenarios (programaciones) de simulación.

5. CONCLUSIONES

Con la metodología propuesta en este estudio, que buscaba una forma de integrar las técnicas de simulación basada en agentes y dinámica de sistemas, se logró demostrar que es posible su acoplamiento para el análisis de un sistema social complejo como es el del transporte público colectivo; haciendo que los resultados obtenidos con la simulación basada en agentes sean parámetros para la simulación macroscópica con dinámica de sistemas, se logró estimar y predecir adecuadamente el impacto que tiene la programación operativa en la calidad del servicio para una ruta del sistema TPCU en una ciudad intermedia como Tunja; por lo que podemos concluir que si es posible a través de las técnicas de simulación basadas en dinámica de sistemas y agentes, predecir la calidad del servicio prestado por un sistema TPCU.

La utilidad de simular el problema con modelos a nivel microscópico y macroscópico, radica en el grado de abstracción que se logra para cada uno de ellos; según sea el nivel de agregación que requiera el modelo, ambas técnicas ofrecen utilidad al permitir comprender el problema desde los dos puntos de vista, micro y macro, en el espacio, tiempo y estructura. Con la utilización de la simulación microscópica se pueden identificar problemas muy puntuales en el transcurso del día, que con el análisis de sus resultados permiten plantear soluciones con el ajuste de la programación operativa (programación de despachos). A nivel macroscópico se puede observar el comportamiento emergente del sistema en un periodo de tiempo lo suficientemente largo, su análisis lleva a la toma de decisiones que no necesariamente tiene que ver con la planeación operativa, sino con la planeación analítica (infraestructura, parque automotor, legislación, etc.) del TPCU.

La importancia de una correcta planeación operativa radica en lograr prestar un servicio con una calidad aceptable para los usuarios y así evitar que migren a otros sistemas de transporte con un mayor costo económico, social y ambiental; por esto es indispensable llevar a cabo un seguimiento, a través de la aplicación del modelado microscópico que aquí se desarrolló, a rutas que presentan problemas de circulación de viajes, con el fin de evaluar el comportamiento del sistema y tomar alguna decisión de ajuste de la programación que lleve a un mejoramiento del servicio a este sector de población y por ende redundar en beneficio de las empresas que prestan el servicio; ya que éste tipo de modelado permitió llegar a un nivel de detalle preciso, como fue el caso de poder hacer el

seguimiento de un vehículo a través de toda la ruta y registrar las velocidades y capacidades que ofrece dicho vehículo; por otro lado permitió analizar el comportamiento de la oferta y la demanda de viajes en los diferentes paraderos y poder mostrar como una determinada programación afecta a estos de manera distintas en momentos variados del día.

Los modelos de simulación planteada en este trabajo son totalmente factibles de utilizar en otras ciudades con características similares, el éxito de los resultados radicará en la calidad de los trabajos de recopilación, clasificación y procesamiento de la información necesaria para ser integrada a la estructura de datos básica requerida por las aplicaciones desarrolladas aquí.

La construcción de modelos de este tipo junto con la implantación de técnicas para la recolección de información permanente del sistema, permitirá el monitoreo y evaluación del comportamiento del sistema constantemente y así proporcionar las herramientas para tomar decisiones acertadas y a tiempo en lo relacionado con la programación de la operación del TPCU; además de permitir una primera aproximación a los sistemas de transporte inteligentes.

6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para la implementación de un sistema de simulación como el que se propuso aquí, es fundamental poder contar con datos obtenidos de estudios previos, ya que el esfuerzo generado para este desarrollo fue arduo y de un profundo análisis por parte de los integrantes de este proyecto.

Aunque el presente trabajo se orientó al análisis y simulación de rutas en forma individual, su concepción podría ser aplicable al análisis de un corredor vial, o de todo el conjunto de rutas de una ciudad, pero para lograr esto es necesario contar con recursos computacionales más exigentes, especialmente para la simulación microscópica, cuando se utiliza una técnicas basadas en agentes; además es conveniente rediseñar la animación de la simulación con una interfaz que permita la visualización de toda la red de TPCU de una ciudad sobre un mapa o plano.

En este estudio se han tenido en cuenta solo dos atributos de la calidad de servicio de un sistema TPCU, con base en este modelo se podría ampliar y tener en cuenta otros factores no menos importantes como son la seguridad, la economía y otras características asociadas a la comodidad como el diseño, la distribución y dimensiones de los elementos que componen la infraestructura del sistema (vehículos, paraderos, accesos, etc.)

REFERENCIAS

- ALCALDÍA MAYOR DE TUNJA. Acuerdo Municipal 0016 de 2004. Por medio del cual se adopta el Plan de Desarrollo del Municipio de Tunja “Restauración social, económica y moral 2004-2007” 2004.
- ARACIL, Javier. Dinámica de sistemas. ISDEFE C/Edison. Madrid. p58. 1995.
- BANKS, J.; CARSON J. S. y B. L. Nelson: Discrete Event System Simulation. Prentice Hall. 1996.
- BARRETO V., Claudia y ESPINEL B., Yolita, Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería, Escuela de Transportes y Vías. CEDEC. TV Tesis 827. 2004.
- BELLIFEMINE, F., POGGI, A., RIMASSA, G. Developing multi-agent systems with JADE. In Intelligent Agents VII. Ed. Castelfranchi, C. and Lesperance. 2001
- BERNAL G, Arquímedes y JIMENEZ G, Edwin. Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Escuela de Transportes y Vías. CEDEC. TV Tesis 822. 2004.
- BERNARD. Robert N, Using Adaptive Agente-Based simulation models to assist planners in policy development: The case of rent control. Department of Urban Planning and Policy Development.
- BERTHET S.; DEMAZEAU Y.; BOISSIER O. Knowing each other better. 11th International Workshop on Distributed Artificial Intelligence. Glen Arbor. 1992.
- BEST, J. W., Como investigar en educación.
- BRUEGGE, B. y DUTOIT, A.H. Ingeniería de Software Orientada a Objetos. México, Ed. Prentice Hall. 2002.
- CEILLER FRANCOIS, E. Continuous System Modeling. Springer-Verlag. 1991
- CENTRO DE SISTEMAS INTELIGENTES, ITESM, México, Dr. Leonardo Garrido, <http://www-csi.mty.itesm.mx/~lgarrido/Personal/thesisProjects.pdf>, abril 2006.
- COLCIENCIAS. http://zulia.colciencias.gov.co:8081/grupos.war/search/EnGrupoInvestigacion/xmlInfo.do?nro_id_grupo=00863102VGLK49. Abril de 2006.
- DI GRESIA, Luciano Mario. Universidad Nacional de la Plata Argentina. <http://www.depeco.econo.unlp.edu.ar/doctrab/doc13.pdf>, abril 2006.
- DUEÑAS RUÍZ, Domingo Ernesto, Método para determinar la calidad del servicio en el Transporte Público Colectivo Urbano. Ed. UPTC. 2003. p 81.
- DUEÑAS RUÍZ, Domingo Ernesto. Calidad del servicio en el sistema de transporte público en buses en ciudades pequeñas e intermedias. Ed. Universidad Politécnica De Valencia. Valencia, España. 2005.
- DUEÑAS RUÍZ, Domingo Ernesto. Libro Urbano: Editorial Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 1997.

- DUEÑAS RUÍZ, Domingo Ernesto. Marco teórico para la programación de la operación: Editorial Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 1997.
- FISHMAN, G.S. Conceptos y métodos en la simulación digital de eventos discretos. Limusa. México. 1978.
- FORRESTER, Jay W. Industrial Dynamics. Productivity Press. 1986.
- GARCÍA DEL VALLE, A., Optimización de rutas, seguridad en el transporte y sistemas GIS. Escuela Politécnica Superior. Universidad de la Coruña España.
- GILBERT N. y TROITZSCH K. G.: Simulation for the Social Scientist, Open University Press 1999.
- GOMEZ RESTREPO, Alejandro, El estado del arte en la modelación de problemas de tránsito, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, 2005.
- GONZÁLES CALLEROS, J.M. ¿Cómo mejorar el flujo vehicular por medio de la simulación?, Ciencias computacionales. Instituto de Astrofísica, óptica y Electrónica. Puebla, México. <http://ccc.inaoep.mx/~grodrig/Descargas/ArtJuan.pdf>, Abril de 2005.
- GRUPO GALATEA. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida Venezuela. <http://mistoy.ing.ula.ve/INVESTIGACION/PROYECTOS/GALATEA/GALWEB/organizamarcos.htm>, abril 2006.
- IGLESIAS, C.; Garijo, M.; Gonzalez, J.; y Velasco, J. Analysis and design of multi agent systems using MASCommonKADS. Springer Verlag 1998.
- JACOBSON Ivor; BOOCH, Grady; RUMBAUGH, J.. El Lenguaje Unificado de Modelado. Madrid, Ed. Addison Wesley. 1999.
- KINNY, D., y Georgeff, M. Modelling and Design of Multi-Agent Systems. Springer-Verlag. 1997.
- LARMAN Cray Applying UML and Patterns. Ed. Prentice Hall. 2002.
- LIND, J. MASSIVE: Software Engineering for Multi-agent Systems. Tesis Doctoral, DFKI. 1999.
- LÓPEZ-PINTOR ALARCÓN, Antonio, Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá, <http://www.aeet.org/ecosistemas/013/articulo3.htm>, Junio 2001.
- MANHEIM, M. L. Fundamental of transportation systems analysis: basic concepts. The MIT Press. Cambridge, MA. 1984. Volumen 1.
- MAUTTONE, Antonio; CANCELA, Héctor y URQUHART, María. Diseño y optimización de rutas y frecuencias en el transporte colectivo urbano. Montevideo, Uruguay. <http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0307.pdf>, Abril de 2006.
- MEYER B., Construcción de Software Orientado a Objetos. Ed. Prentice-Hall. 1998.
- MINSKY, Marvin. The Society of Mind. New York: Simon & Shuster, 1985.
- MOLLER, Rolf. Universidad del Valle. Primer Foro Regional de Transporte Intermodal y Logística: Diagnóstico y Perspectivas, Santiago de Cali, Marzo 4 de 2004.

- NIGEL, Gilbert y TROITZSCH, Klaus G.: Simulation for the Social Scientist. Open University Press 1999.
- Object Management Group, 2001. OMG Unified Modeling Language Specification. www.omg.org.
- PACHECO CALCÍN, Oscar. Universidad Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Brasil. <http://clei2004.spc.org.pe/es/html/pdfs/73.pdf>, Abril 2006.
- PRESSMAN Rogger. Software Engineering. A practitioner's Approach. Ed. MacGraw-Hill, 2005.
- RALL, J.C., Análisis dinámico urbano: Nuevos enfoques para actuar contra el ruido. Facultad de arquitectura, planeamiento y diseño. Universidad Nacional del Rosario. Río Bamba. Argentina.
- SAMPER MÁRQUEZ, Juan José. Trabajo sobre Agentes Inteligentes. Disponible en la página web: <http://www.neoyet.com/Agentes.htm>, Febrero de 2006.
- SENGE, Peter. La quinta disciplina, Ediciones Granica. 1992.
- SERRANO, Á. Un modelo de simulación para la evaluación de sistemas de transporte público masivo. Departamento de Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá Colombia.
- SHANNON, R.E. Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación. Trillas, México, 1988.
- SHOHAM Y. Agent-oriented programming. Technical Report STAN-CS-1335-90. Computer Science Department. Stanford University, Stanford. CA. 1990.
- SWARM.ORG. Técnicas de modelamiento utilizados por la plataforma Swarm basada en agentes, www.swarm.org, Enero 2006.
- TAMAYO Y TAMAYO, Mario. El proceso de la investigación científica. Ed. Limusa, México, 2003.
- Tesis de pregrado Ingeniería de Transportes y Vías. Programación de la operación del transporte público colectivo urbano - herramientas computacionales. Código de búsqueda: T5302.
- Trabajo Docente. Programa computacional para estudios de velocidades y tiempos de recorrido. Código de búsqueda 223.5 Disponible en: Sección C Biblioteca Central UPTC. Medio magnético.
- Trabajo Docente. Programación de la operación del transporte público colectivo urbano, herramientas computacionales. Código de búsqueda 233.8. Ubicación Geográfica C956. Disponible en: Sección C Biblioteca Central UPTC. Medio magnético..
- UNIVERSIDAD DE BARCELONA, http://www.ub.es/comporta/doct0103_treballs_llista_e.html, Enero 2006.
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Mérida, Venezuela, http://cesimo.ing.ula.ve/INVESTIGACION/public_tesis.html, Febrero de 2006.
- Wikipedi.org, disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Transporte>, visitado en abril de 2006.

- Wikipedi.org, http://es.wikipedia.org/wiki/Transporte_p%C3%BAblico, Abril de 2006.
- WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R.; y KINNY, D.. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design. Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 15. 2000.
- WOOLDRIDGE, Michael. Agent Based Software Engineering. Department of Computing Manchester Metropolitan University. United Kingdom. Disponible en <http://www.csc.liv.ac.uk/~mjw/pubs/abse.pdf>, Abril de 2006.
- ZEIGLER, Bernard P.; PRAEHOFER, Herbert; KIM, Tag Gon. Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems. Academic Pr. 2000.

ANEXOS

ANEXO A. Mapa de la Ruta Reten Sur – Muiscas, de la Ciudad de Tunja.

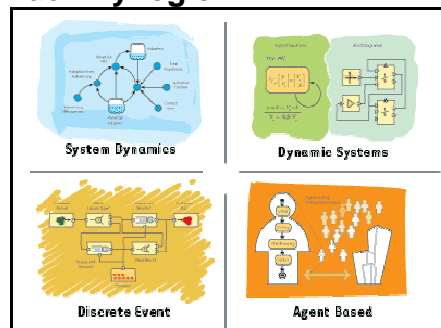


————— Ruta

ANEXO B. Descripción de las características de AnyLogic.

Enfoques de simulación que soporta AnyLogic: Es una herramienta de simulación multiparadigma que soporta eventos discretos, continuos, agentes inteligentes, dinámica de sistemas y sistemas dinámicos. Además posee un conjunto de herramientas que permiten no solo el análisis del problema sino que encuentra el modelo más óptimo para la solución.

Paradigmas de simulación de AnyLogic



Fuente: www.xjtek.com

Características de AnyLogic: Dentro de las características más relevantes de esta poderosa herramienta de simulación están:

- Uso de herramientas para manipular los diferentes modelos (Objetos, Interfaces, diagramas de bloques, de flujos, timers o controles de tiempo, manejo de mensajes, variables y ecuaciones tanto algebraicas como diferenciales, así como la habilidad de insertar expresión o funciones en lenguaje JAVA).
- Arquitectura abierta. Los modelos pueden ser leídos dinámicamente y puede escribir los datos en hojas de cálculo, bases de datos, ERP o sistemas de CRM.
- Permite llevar a cabo análisis estocástico y probabilísticos.
- Se puede crear cualquier tipo de animación interactiva, incluyendo gráficos e imágenes de librerías o biblioteca pre-definidas.
- Los modelos pueden ser trabajados de forma transparente en ambientes como Windows, Solaris, Linux, MacOS, y otros, además permite a los clientes remotos ejecutar los modelos desde un ambiente WEB sin ninguna restricción.

Niveles de Modelado: Los niveles de modelado de AnyLogic son buenos para resolver problemas de alta complejidad, de cualquier dimensión y a cualquier

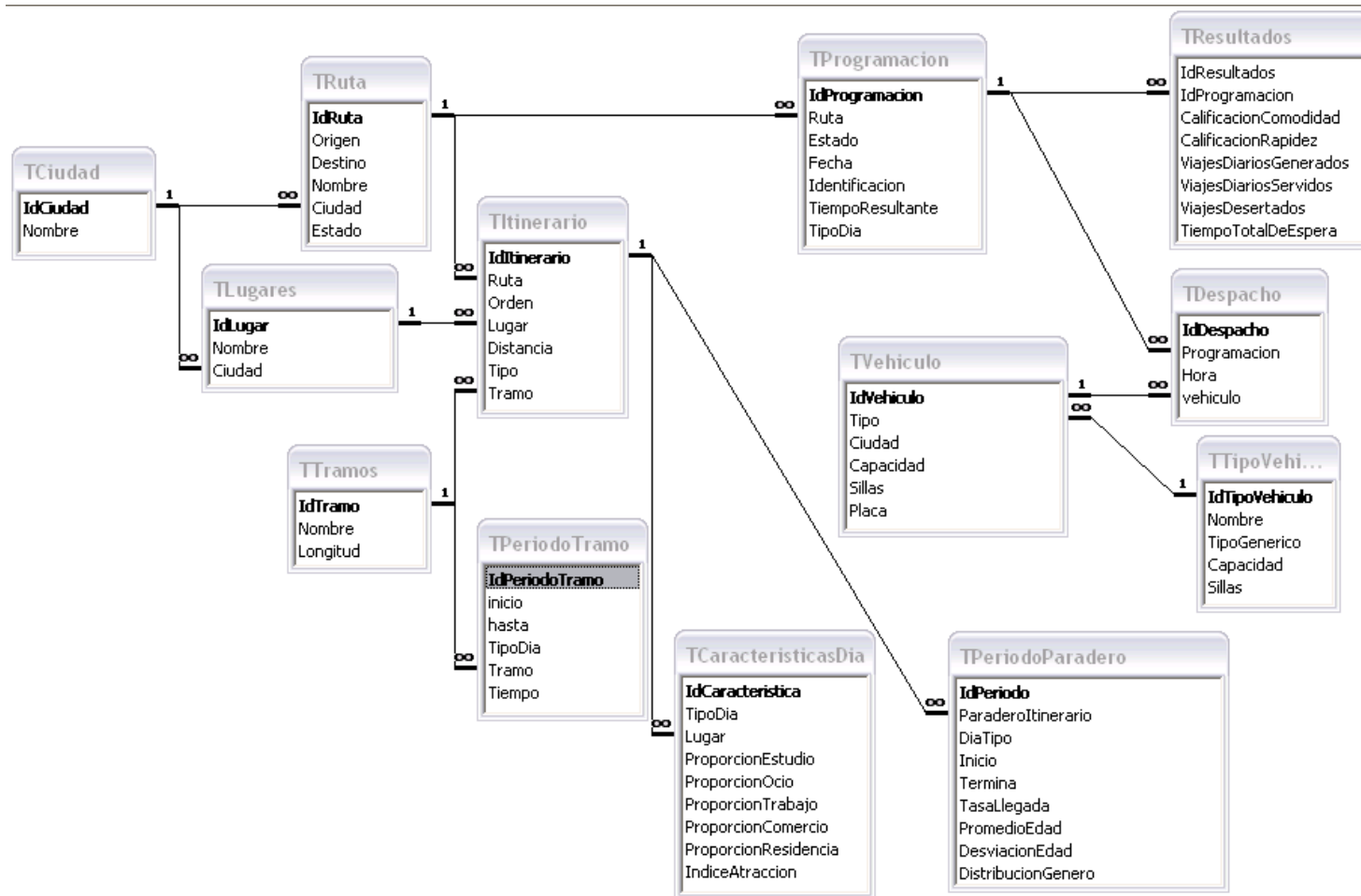
grado de abstracción, incluyendo el modelado de sistemas muy heterogéneos. La herramienta se utiliza a niveles “micro” cuando se requieren valores exactos (distancias, velocidades, y tiempos de reloj) y a niveles “macro” cuando de decisiones estratégicas se trata. Los principales niveles de aplicación son:

- Niveles estratégicos: Competencia de mercados, Gerencia de proyectos, Social y Dinámica de los Ecosistemas, Dinámica urbana, Economía en Salud.
- Nivel Operacional: Cuidado de la salud, Telecom, Departamentos de Emergencias, Flujo de materiales, Cadenas de suministros, el tráfico, Sector eléctrico, el transporte, Sistemas y Control dinámico, entre otros.
- Nivel Físico: Movimiento de peatones y vehículos, tráfico de las Carreteras, análisis y diseño para las áreas de servicio (estadios, museos, aeropuertos).

Requisitos del sistema:


- Hardware
 - Computador pentium III (1 GHz recomendado)
 - Memoria RAM 256 MB (512 MB recomendado)
 - Espacio libre en disco 170 MB (250 MB durante la instalación)
 - Monitor con alta resolución de 1024x768 más o menos.
 - Ratón
- Sistema operativo
 - Microsoft Windows XP, o Microsoft Windows 2000.
- Software Adicional
 - Máquina virtual de Java

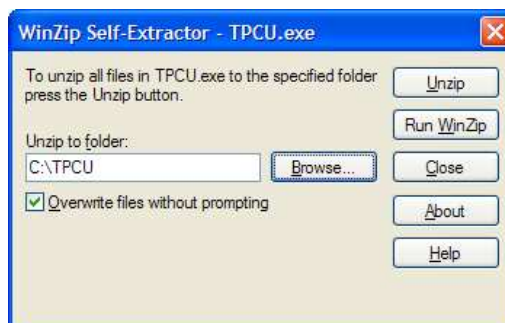
ANEXO C. Persistencia de los datos.



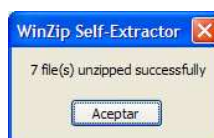
ANEXO D. Instalación y ejecución del software de simulación.

A continuación se describen los pasos a tener en cuenta para la instalación y ejecución de cada uno de los simuladores (agentes y dinámica de sistemas):

- Verifique que se encuentre instalada y en ejecución en el computador la Máquina Virtual de Java.
- El software está diseñado para ser ejecutado con una pantalla que posea una resolución de 1024 * 768 pixeles, compruebe la configuración antes de ejecutar el paso 3.
- Ejecute el archivo TPCU.exe, haciendo clic sobre el icono () o sobre el nombre de archivo que se encuentra en la raíz del CD etiquetado software de simulación, a continuación verá una pantalla como la siguiente:



En la sección denominada *Unzip to fólдер.*, debe colocar la unidad de disco duro en la cual va a instalar el software además de dar el nombre al directorio en donde se copiarán los archivos relacionados con los dos simuladores (puede realizar esta acción utilizando el botón Browse...). A continuación oprima el botón Unzip; luego aparece la siguiente ventana:



Esto demuestra que se han copiado siete archivos relacionados con el software de simulación; estos archivos son:

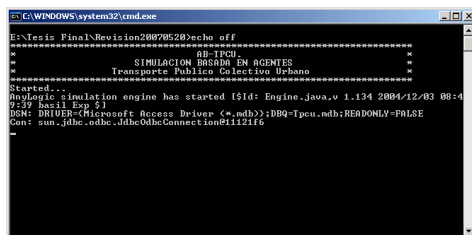
- **Tpcu.mdb**: Archivo en el cual se almacenan los datos de los parámetros que se utilizan como entrada de cada uno de los simuladores.
- **AB-TPCU.BAT**: Archivo para ejecutar el simulador con AGENTES.
- **SD-TPCU.BAT**: Archivo para ejecutar el simulador con DINÁMICA.
- **ABTPCUModel.jar**: Archivo que empaqueta el modelo desarrollado en AnyLogic basado en AGENTES.
- **business_graphics_library.jar**: Librería que permite utilizar las herramientas para la presentación de gráficos de los simuladores.
- **SDTPCUModel.jar**: Archivo que empaqueta el modelo desarrollado en AnyLogic basado en DINÁMICA DE SISTEMAS.
- **xjAnyLogic5engine.jar**: Librería principal de AnyLogic que contiene todas las herramientas que soportan ésta herramienta informática.

Finalmente se oprime el botón Aceptar y retoma el control la ventana inicial; oprima el botón Close y ya tienen los simuladores instalados en su computador.

- Puede ejecutar el simulador basado en agentes (análisis microscópico del sistema TPCU) ejecutando el archivo AB-TPCU.bat, o con el archivo SD-TPCU.bat ejecuta el simulador con dinámica de sistemas (análisis macroscópico del sistema TPCU).

ANEXO E. Manual de uso del software de simulación con agentes.

El ingreso al simulador presentará una ventana como la siguiente (esto sucede cuando ejecuta el archivo AB-TPCU.bat):

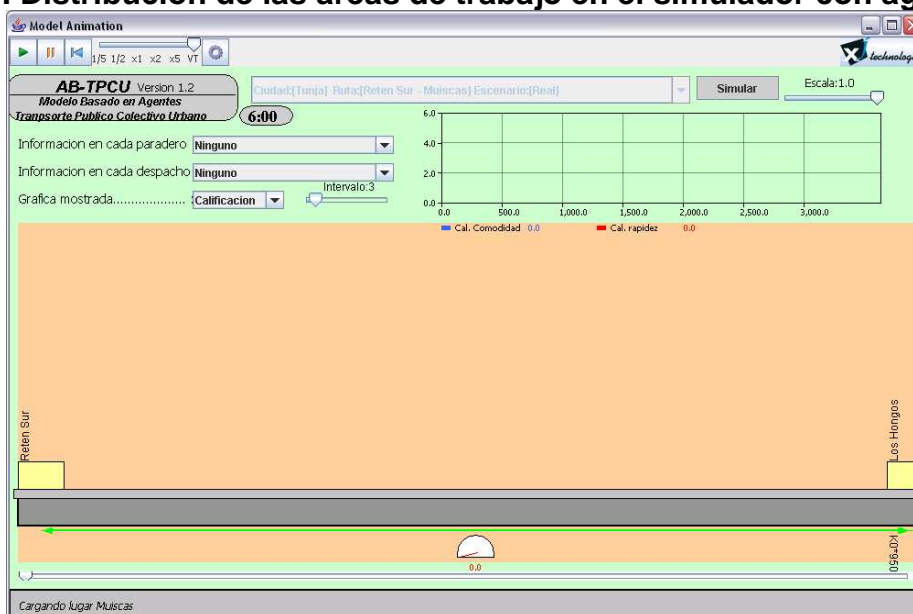


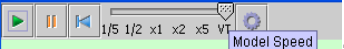
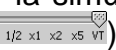
```
E:\Inici Final\Revision20070520\mcho off
=====
*
*   AB-TPCU
*   SIMULACION BASADA EN AGENTES
*   Transporte Publico Colectivo Urbano
*
=====
Started...
AnyLogic simulation engine has started (Std: Engine_Java.v 1.134 2004/12/03 08:4
9:59 Inst1 Exp 5)
DSN= DRIVER={Microsoft Access Driver (*.mdb)};DBQ=Tpcu.mdb;READONLY=FALSE
Con= sun.jdbc.odbc.JdbcOdbcConnection@11121f6
```


En este momento el usuario deberá esperar unos segundos mientras el simulador hace la conexión con la base de datos de parámetros y carga las librerías necesarias para su normal desempeño.

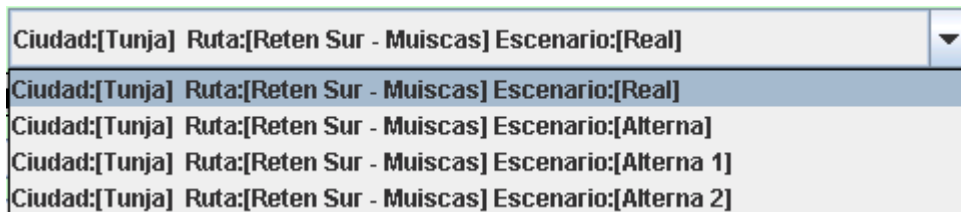
Distribución de las áreas de trabajo en el simulador. La Figura 1, muestra cada una de las áreas que componen el software de simulación. En seguida se describe cada uno de los elementos que lo integran y la forma de activar o desactivar su funcionamiento.

Figura 1. Distribución de las áreas de trabajo en el simulador con agentes

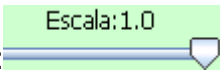



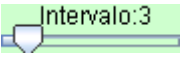
En la parte superior de la figura (área gris, bajo la barra azul del título “Model Animation”), se encuentran una serie de botones: , los cuales permiten manipular la velocidad de simulación; el primero de ellos permite retomar la simulación (▶), luego de haber oprimido el botón pause (⏸); también se puede reiniciar la simulación con el botón ◀; en seguida se encuentra una barra de progreso (1/5 1/2 x1 x2 x5 VT) la cual se puede manipular con el botón , desplazándolo hacia delante y hacia atrás; cuando se desea que el simulador se ejecute a 1/5 de la velocidad de proceso, se coloca en la opción (1/5) y se va incrementando hasta llegar a x5; la opción VT (la última en localización), es la velocidad virtual de la máquina, haciendo que el simulador se ejecute a la máxima velocidad posible.

En la siguiente sección (área verde), se encuentran los elementos que permiten configurar las diferentes acciones que realiza el simulador. En la parte izquierda de ésta área se encuentra el título de la aplicación “**AB-TPCU**”, así como su versión de desarrollo, continuando hacia abajo se encuentran tres conjuntos de botones de selección “Pasajero”, “Despacho” y “Gráfica”, que se describirán más adelante; hacia el frente del título de la aplicación, se encuentra la información relacionada con la configuración del simulador, tal como: nombre de la Ciudad en la que se aplicará la simulación, para este caso es “**Ciudad:[Tunja]**”, nombre de la Ruta “**Ruta:[Reten Sur – Muiscas]**” y por último la programación de la ruta o escenario, en este caso: “**Escenario:[Real]**”, que es una programación de prueba para realizar otros análisis. Se puede observar al lado de esta información un icono de la siguiente forma: , éste despliega una lista de opciones para seleccionar el escenario con el cual se hará la simulación, algo como lo que se muestra a continuación:



en el se encuentran las diferentes programaciones de ruta que se hallan almacenadas en la base de datos. A espacio seguido se encuentra el botón “**Cargar datos**”, el cual permite conectar la base de datos que contiene información de los parámetros, esta información tiene que ver con la configuración de paraderos, tramos, velocidades, itinerarios y otros elementos que más adelante se describen. Al lado de éste botón se encuentra una barra de nivel representada por el

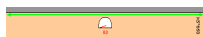
símbolo: , el cual permite aumentar o disminuir la forma en la que se aprecia la ruta (acorta, desde el punto de vista óptico la distancia entre paraderos). Al lado de la información de título de la aplicación, y versión, se encuentra un óvalo con un número interno , este representa la hora de inicio de la simulación, para el ejemplo el tiempo representado es de seis horas, cero minutos. En la parte inferior derecha del área verde (área de configuración del

simulador), se encuentra la gráfica que muestra los comportamientos del sistema TPCU, que permiten observar, la rapidez, la comodidad, ciertas medidas de volúmenes y la calificación del servicio, en cuanto a comodidad y rapidez; esto es manipulable desde los botones de selección del grupo de botones denominado: “Gráfica”. Al seleccionar el tipo de gráfica que se desea observar, éste hace un swap (intercambio en la observación de las gráficas) y cambia inmediatamente a la opción seleccionada, este proceso se muestra más adelante. Bajo el grupo de botones de selección denominado “Gráfica”, se encuentra una barra de nivel denominada intervalo , que permite configurar el rango de tiempo para refrescar la información mostrada en el tipo de gráfica seleccionada, por ejemplo refrescar la información de la gráfica cada 3, 5, 10, 15 o más unidades de tiempo.

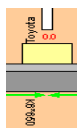
La figura 2 muestra en el área intermedia (de color rosado) los diferentes agentes que intervienen en la simulación de un sistema TPCU, estos se activan cuando el botón “Cargar datos”, cambia su nombre o etiqueta por el de “Simular” y éste se acciona. Los elementos relacionados con esta área son:



: EL rectángulo amarillo, representa los paraderos y sobre éste se encuentra su nombre, en este caso el paradero se denomina “UPTC”.



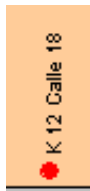
: La flecha de color verde, representa la distancia que existe entre un origen y un destino, además de mostrar la velocidad máxima permitida para el rodamiento de los vehículos, en un tramo, la imagen anterior muestra un “tramo”.



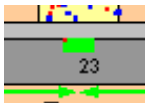
: La etiqueta negra bajo el elemento de color gris, representa la distancia que existe entre el origen “paradero Reten sur” y un determinado paradero, esta medida se muestra en dos secciones, la primera es “kn”, en donde “k” representa el número de kilómetros existentes y “n” es un número entero positivo) y “+n”, que representa la cantidad en metros que hay después de esos kilómetros. En este caso en particular se dice que hay una distancia entre el lugar de origen (Reten Sur) y el destino (Toyota) de seis kilómetros más seiscientos cincuenta metros.



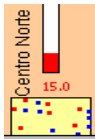
: La parte gris representa la vía por la cual circulan los vehículos.



: Existen algunos puntos de color rojo sobre la vía, estos representan lugares de referencia para poder configurar velocidades.



: El rectángulo de color verde (sobre la vía) representa los vehículos del sistema TPCU, el número que aparece bajo éste, es la cantidad de pasajeros que en el momento transporta. Los vehículos aparecen cuando el botón “**Cargar datos**” cambia su nombre o etiqueta por el de “**Simular**”, y éste se activa, a continuación aparece el primer vehículo y luego los demás tal y como se parametrizaron en la base de datos.



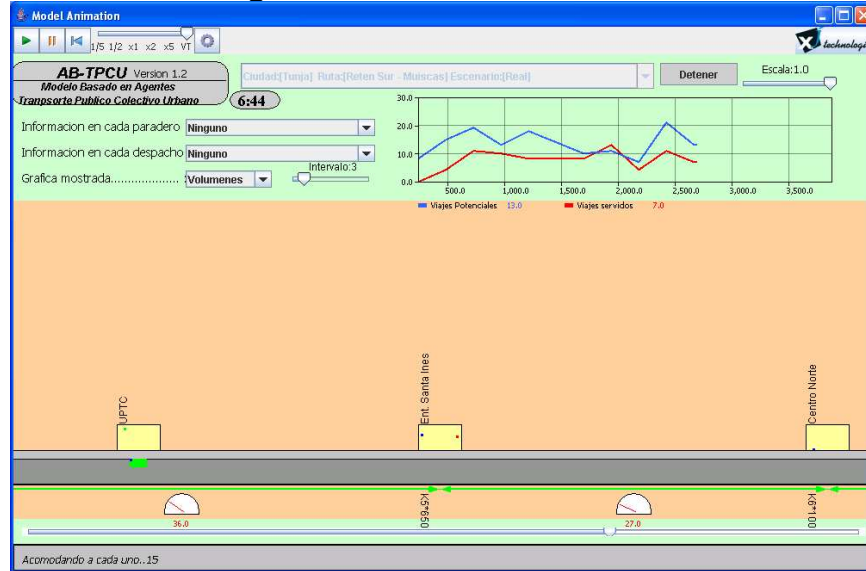
: Los puntos rojos y azules (dentro del paradero) representan a los usuarios del sistema TPCU.



: La barra de desplazamiento que se encuentra bajo el área rosada, permite desplazar los objetos (paraderos, tramos, y otros elementos estáticos de la simulación) hacia adelante o hacia atrás, permitiendo observar el movimiento del vehículo mientras éste pasa por los diferentes paraderos que tiene la ruta.

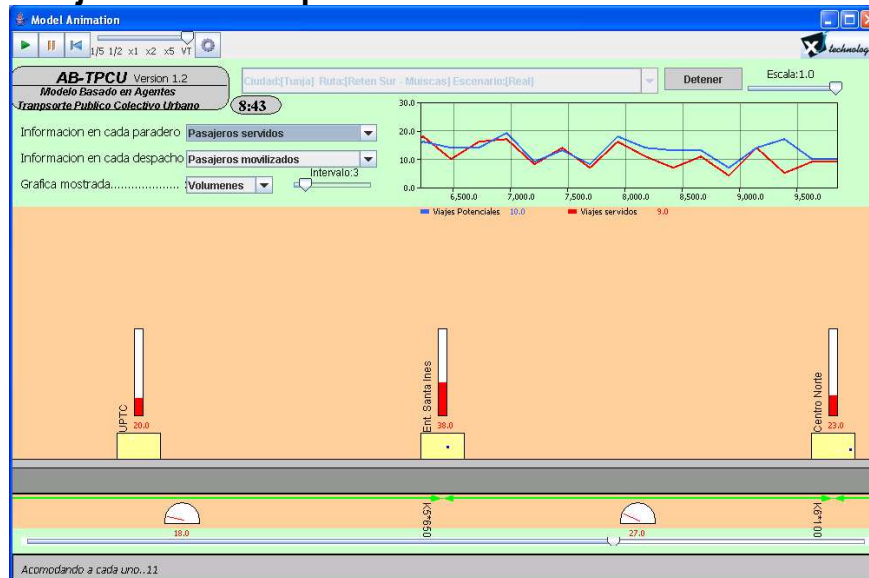
El simulador en funcionamiento. La Figura 2 muestra el simulador en funcionamiento, en el cual se observa que un determinado vehículo (rectángulo verde sobre la vía) en este momento transporta 23 pasajeros, se está desplazando dentro del tramo: “Entrada Santa Inés – Centro Norte”, que se encuentra ubicado dentro de la ruta, entre el kilómetro cinco (5) mas (+)seis cientos cincuenta (650) metros y el kilómetro seis (6) mas (+) cien (100) metros, además la hora en la que está transitando es: seis horas y treinta y un minutos (6:31); también se puede ver que la velocidad promedio en este tramo es de veintisiete kilómetros por hora (27.0). Al paradero “Ent. Santa Inés”, han ingresado al sistema desde la hora de inicio de la simulación, 13 personas, y al paradero “Centro Norte”, 8 personas.

Figura 2. Simulador con agentes en funcionamiento



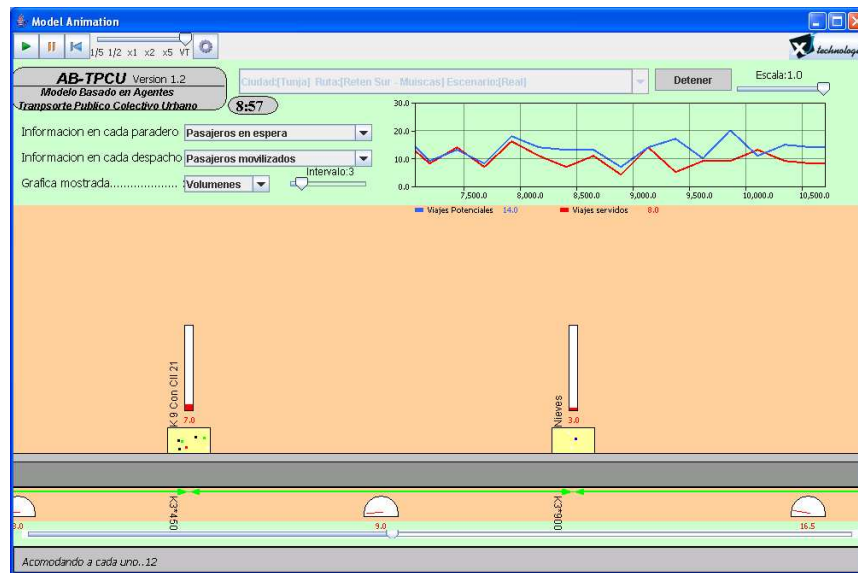
En la Figura 3 se observa como la barra blanca (sobre los paraderos) muestra la cantidad de pasajeros servidos por el sistema TPCU, en este momento (8:43) los pasajeros servidos son: Paradero UPTC, 20 personas; Ent. Santa Inés, 38 personas y en el paradero “Centro Norte”, 23 personas.

Figura 3. Pasajeros servidos por el sistema TPCU.



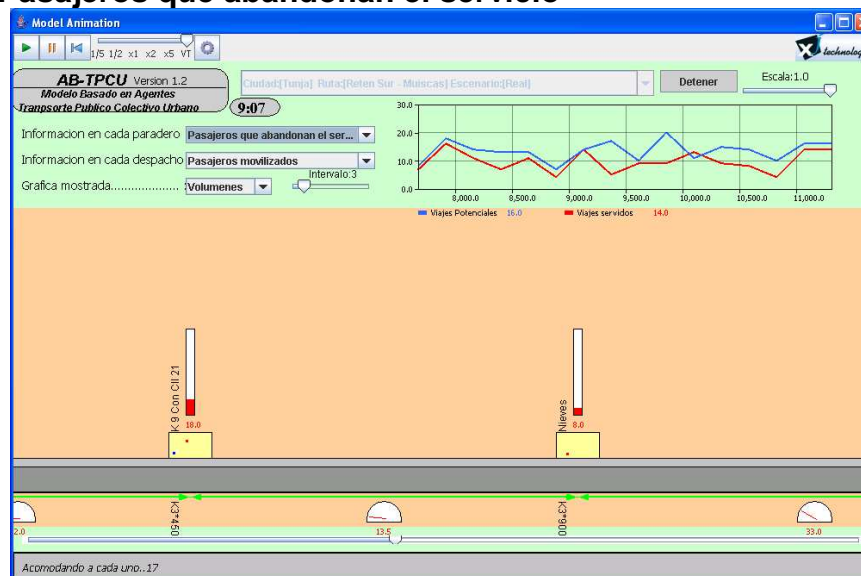
En la Figura 4 se observan los “Pasajeros en espera” de ser servidos, en este caso en el paradero “K9 con CII 21”, se encuentran 7 personas (puntos rojos y azules) y en el paradero de las “Nieves”, 3 personas.

Figura 4. Pasajeros en espera de servicio



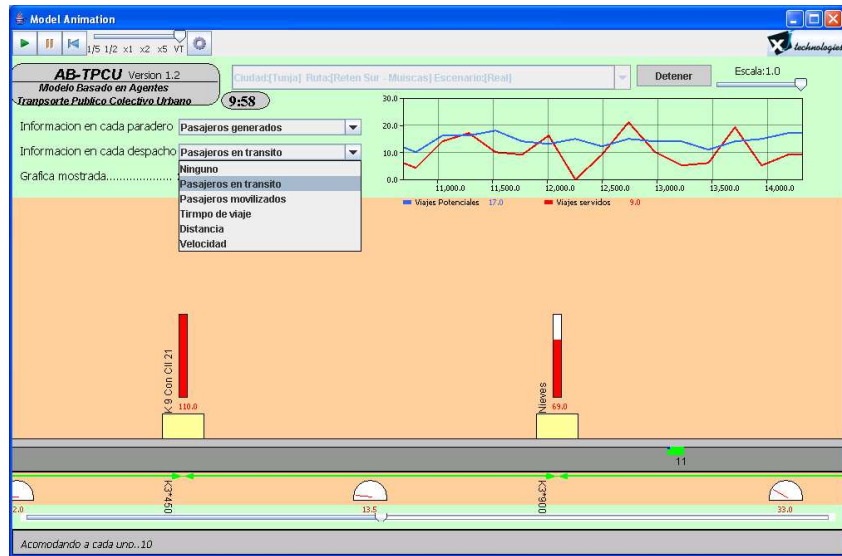
En la figura 5, la barra blanca representa la cantidad de pasajeros que han desertado del sistema TPCU por diversas causas, en este caso el paradero “K9 con Cll 21”, abandonaron 18 personas y en el paradero de las “Nieves”, 8 personas.

Figura 5. Pasajeros que abandonan el servicio



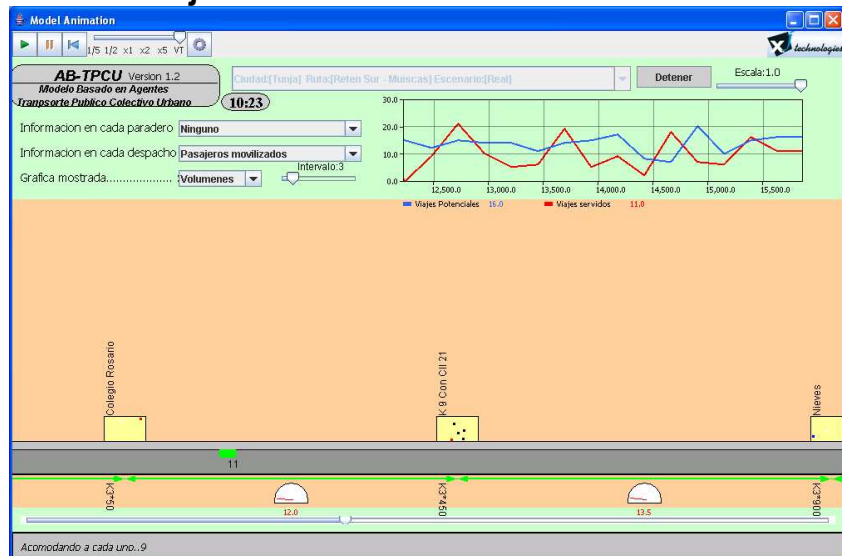
En la Figura 6 se observa que las opciones del combo-box “Información en cada Despacho”, están directamente relacionadas con el vehículo y a su vez con la etiqueta que se observa bajo el rectángulo verde (bus); se muestra que en el momento (9:58 a.m.), el vehículo transporta 11 pasajeros.

Figura 6. Opciones relacionadas con el despacho



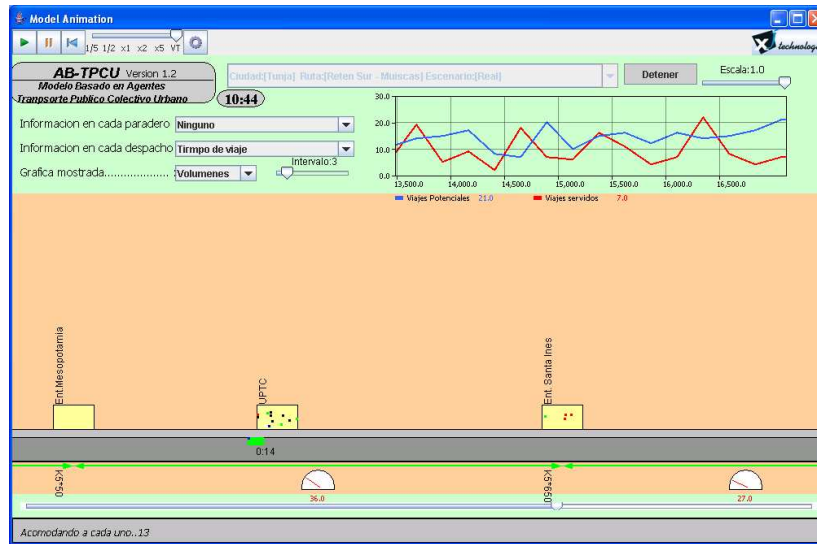
Por otro lado, en la figura 7, a las 10:23, muestra que el número total de pasajeros servidos desde el inicio del recorrido por éste vehículo es de 11 personas.

Figura 7. Total de Pasajeros movilizados



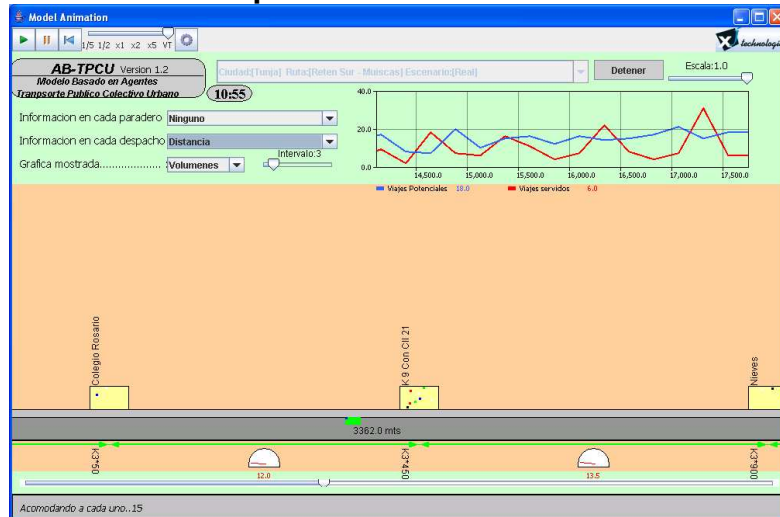
En la Figura 8 se observa el tiempo total empleado por el vehículo para desplazarse desde el lugar de origen (Reten Sur), hasta el lugar en donde está en este momento; en este caso ha empleado 14 minutos de viaje.

Figura 8. Tiempo de viaje



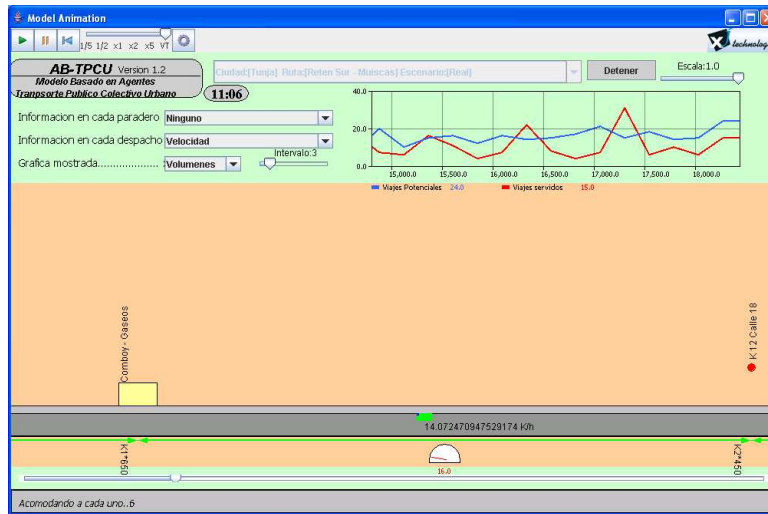
La distancia recorrida por el vehículo que se observa en la figura 9, es de 3.362 metros o 3 Kilómetros + 362 metros, desde el paradero de origen (Reten sur) hasta el lugar en donde se encuentra.

Figura 9. Distancia recorrida por el vehículo



La medida de velocidad del vehículo observado en la Figura 10, es de 14.07 Kilómetros por hora (Km/h), aproximadamente, se puede decir que esta dentro de los límites de velocidad permitido para este tramo (16.0 km/h).

Figura 10. Velocidad del vehículo



Para observar las diferentes gráficas que genera el simulador, el usuario debe desplegar el combo-box etiquetado “Gráfica mostrada” que se muestra en la figura 11; las opciones son: Rapidez, Comodidad, Volúmenes y Calificación.

Figura 11. Graficas del simulador



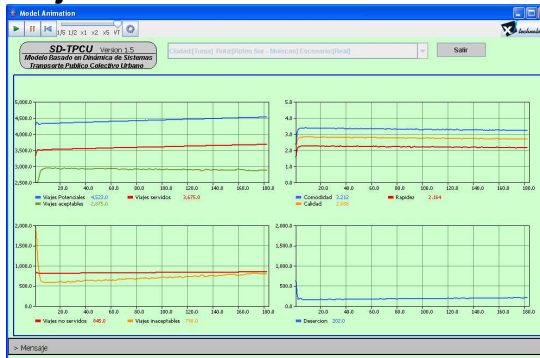
Para salir del simulador se dirige a la esquina superior derecha y marca la X.


ANEXO F. Manual de uso del software de simulación con dinámica de sistemas.

A continuación se describe la forma como se debe manejar el simulador basado en dinámica de sistemas. Para esto se describen las áreas que componen la pantalla del simulador, y la forma de cargar y observar los resultados obtenidos

Distribución de las áreas de trabajo en el simulador. La Figura 1, muestra cada una de las áreas que componen el software de simulación. En seguida se describe cada uno de los elementos que lo integran y la forma de activar o desactivar su funcionamiento.

Figura 1. Áreas de trabajo del simulador con dinámica de sistemas



En la figura anterior se observan tres áreas principales en las cuales se divide el simulador con dinámica de sistemas; la primera (parte superior de la pantalla), se muestra el nombre de la aplicación “**SD-TPCU**”, la versión “**1.5**” y el sistema al cual se le aplica la simulación “**Transporte Público Colectivo Urbano**”, al lado derecho de esta sección (Cuadro con esquinas redondeadas, de color gris) se encuentra la información relacionada con la configuración del simulador, tal como: nombre de la Ciudad en la que se aplica, para este caso es “**Ciudad: [Tunjá]**”, nombre de la “**Ruta: [Reten Sur – Muiscas]**” y por último la programación de la ruta, en este caso: “**Escenario: [Real]**”. Se puede observar al lado de esta información un icono de la siguiente forma:  éste permite cambiar los escenarios, es decir las diferentes programaciones de ruta que se encuentran

almacenadas en la base de datos. A espacio seguido se encuentra el botón “**Cargar datos**”, el cual permite conectar la base de datos que contiene información de los parámetros, esta información tiene que ver con los resultados obtenidos en la simulación del modelo microscópico (simulador con agentes) y el cual fue almacenada en la tabla “TResultados”. La segunda área delimitada por un cuadro de color azul con esquinas redondeadas, representa el espacio para mostrar las gráficas de comportamiento que presenta el simulador; la primera de éstas (esquina superior izquierda) muestra el comportamiento a través del tiempo de las variables relacionadas con “Viajes potenciales, servidos y aceptados”, al lado derecho de esta gráfica se muestra el comportamiento relacionado con la evaluación de comodidad, rapidez y calidad; bajo estas dos gráficas, lado izquierdo, se encuentra la representación del comportamiento relacionado con las variables: Viajes inaceptables, Viajes no servidos y al lado derecho de esta, muestra el comportamiento de la variable deserción. La tercera y última de las áreas representa una sección en la cual se muestran algunos mensajes que se pueden generar en el transcurso del funcionamiento del simulador (Rectángulo de color gris).

El simulador en funcionamiento. En la Figura 2 se observa el simulador en funcionamiento, las variables relacionadas con cada gráfica poseen un color determinado el cual se conecta directamente con la curva que se va mostrando en la gráfica específica. Para cargar la información relacionada con los parámetros que se requieren en éste simulador (dinámica de sistemas) se acciona el botón “**Cargar datos**”, el cual permite leer los resultados almacenados en la base de datos y más específicamente en la tabla “TResultados”, que fueron generados por la simulación microscópica. Se observa que al accionar el botón antes mencionado, la etiqueta de éste cambia por “Simular”. El simulador empieza a funcionar luego de accionar el botón etiquetado “Simular”

Figura 2. Simulador con dinámica de sistemas en funcionamiento

