

Departamento de Investigación Operativa  
Instituto de Computación - Facultad de Ingeniería  
Universidad de la República  
Montevideo - Uruguay

Proyecto de Grado  
Ingeniería en Computación

# Simulación de sistemas de transporte público con servicios de información a usuarios en tiempo real

Informe Final

**Autores**

Emilio Nacelle  
Matías Estrada  
Leandro Segura

**Supervisor**

Dr. Antonio Mauttone



# Resumen

Este proyecto trata sobre el modelado y simulación de sistemas de transporte público donde existen servicios de información al usuario en tiempo real. Estos servicios brindan información actualizada a los usuarios (por ejemplo, a través de paneles en las paradas o de los dispositivos móviles) acerca del estado del sistema (ubicación de los ómnibus, tiempo restante para llegar a la parada), de modo que puedan tomarse decisiones que afectan el viaje a realizarse. Por ejemplo, un usuario esperando en una parada por dos líneas, puede dejar pasar el ómnibus de una, dado que acaba de informarse que el ómnibus de la línea que tiene un recorrido más corto a destino está por pasar. En este proyecto se realiza un relevamiento de dichos servicios a nivel regional y un estudio de los principales modelos existentes en la literatura para representarlos. Posteriormente se realiza una propuesta de un modelo concreto con diferentes variantes de comportamiento de pasajeros y el diseño e implementación de un prototipo de software basado en la técnica de simulación a eventos discretos, que permite realizar experimentos computacionales con un caso de prueba relativo a una ciudad de la región. A partir de la experimentación con el prototipo se analizan resultados que permiten evaluar el impacto de la información en tiempo real sobre los pasajeros, según diferentes hipótesis asumidas acerca de su comportamiento. Los resultados obtenidos para la realidad con la que se experimentó (Rivera, Uruguay), indican que si los pasajeros acceden a los horarios de arribo a las paradas de los ómnibus, disminuyen significativamente los tiempos de viaje de los pasajeros. Aún más si esta información es actualizada en tiempo real.



# Tabla de contenido

1. Introducción .....	7
1.1. Contexto .....	7
1.2. Objetivos .....	8
1.3. Resultados esperados .....	8
1.4. Estructura del informe.....	9
2. Marco Teórico .....	11
2.1. Antecedentes .....	11
2.1.1. Estrategias .....	11
2.1.2. Información en tiempo real.....	12
2.2. Modelado de sistemas de transporte público.....	12
2.2.1. Modelo de red .....	13
2.2.2. Modelo de comportamiento de pasajeros.....	16
2.2.3. Simulación a eventos discretos .....	16
3. Servicios de información a usuarios de transporte público .....	19
3.1. Servicios nacionales .....	19
3.2. Servicios Extranjeros .....	20
3.3. Observaciones.....	22
4. Modelo de simulación de transporte público.....	25
4.1. Introducción.....	25
4.2. Modelos de comportamiento de pasajeros .....	26
4.2.1. Acceso constante a la información sobre todas las líneas (Modelo 1) .....	27
4.2.2. Acceso a la información solo en origen (Modelo 2) .....	27
4.2.3. Acceso a la información para una única línea (Modelo 3) .....	28
4.2.4. Sin información usando tabla de horarios estática (Modelo 4).....	29
4.2.5. Acceso a la información solamente en parada (Modelo 5) .....	29
4.2.6. Sin información ponderando por frecuencia (Modelo 6) .....	30
4.2.7. Comparativa entre modelos .....	30
4.3. Diseño .....	31

4.3.1. Diagrama de clases .....	31
4.4. Modelo de simulación .....	38
4.5. Consideraciones de implementación .....	43
5. Experimentación .....	45
5.1. Verificación .....	45
5.2. Experimentos .....	49
5.2.1. Experimento 1 - Efectos de los modelos sobre los tiempos totales de viaje .....	50
5.2.2. Experimento 2 - Efecto de la regularidad de los ómnibus en el sistema de transporte, sobre los tiempos totales .....	57
5.2.3. Experimento 3 - Escenario de un sistema de transporte de muy altas frecuencias ..	63
6. Conclusiones y trabajos a futuro .....	69
6.1. Conclusiones .....	69
6.2. Trabajos a futuro .....	70
Bibliografía .....	71
Apéndice A - Tablas de estudio de servicios de información en tiempo real para sistemas de transporte.....	75
Apéndice B - Archivos de salida del simulador.....	91
Apéndice C - Descripción caso de Rivera .....	95
Apéndice D - Manual de usuario .....	97

# 1. Introducción

La planificación de sistemas de transporte público (en particular aquellos basados en ómnibus) implica, entre otras cosas, diseñar un conjunto de líneas que constan de un recorrido y una frecuencia de salida. Los modelos existentes para el diseño de líneas, consideran datos referentes a la infraestructura sobre la que se definen (red de calles) y a la demanda que debe transportarse entre diferentes puntos de la ciudad (matriz origen-destino). Además, asumen hipótesis acerca del comportamiento de los usuarios con respecto a un conjunto de líneas.

Estas hipótesis deben establecer los criterios bajo los cuales un usuario espera por una o varias líneas, si prefiere esperar más y tomar una línea más rápida o si prefiere hacer transbordos. La aplicación de un modelo consistente con dichas hipótesis permite la obtención de medidas de performance (por ejemplo, tiempos de viaje, carga de las líneas) que constituyen un apoyo a la toma de decisiones de los planificadores [27].

En los últimos años, los sistemas de transporte público han incorporado tecnologías que permiten informar a los usuarios acerca del estado de sistema. Por ejemplo: información en la parada o en un dispositivo móvil, que indica la posición o el tiempo que resta para que los ómnibus arriben al punto donde el usuario está esperando. Estos servicios de información en tiempo real, modifican el comportamiento de los usuarios con respecto a las líneas y por lo tanto pueden modificar los tiempos totales de viaje (o su percepción) y/o las ocupaciones de las líneas. Los modelos y herramientas para evaluar el efecto de estos servicios de información en tiempo real sobre los usuarios son escasos [10].

Este proyecto propone: (1) un relevamiento de los servicios de información en tiempo real a usuarios de transporte público, con énfasis en los disponibles a nivel regional y nacional, (2) el desarrollo de un prototipo de software que permita modelar las principales características de dichos sistemas, realizar experimentos, obtener resultados y formular conclusiones y (3) aplicación con casos de estudio del país o de la región. El proyecto parte de antecedentes de proyectos de grado dirigidos por el cuerpo docente proponente [16] e interactúa con un proyecto de investigación y desarrollo. Implica el entendimiento de la dinámica de los sistemas de transporte público y su modelado utilizando, entre otras, técnicas de simulación a eventos discretos [30].

## 1.1. Contexto

El proyecto se enmarca en la línea de trabajo del Departamento de Investigación Operativa del Instituto de Computación de la Facultad de Ingeniería de la UdelAR, acerca de la aplicación de metodologías y herramientas de la Investigación Operativa a problemas de transporte público. El grupo ha desarrollado metodologías para el diseño de recorridos y frecuencias de ómnibus, tanto mediante modelos estáticos (no se modela la evolución del sistema en el tiempo, se asumen

condiciones de operación en estado estacionario) [13] como dinámicos (si se modela, en el periodo de tiempo de operación del sistema, permitiendo incluir aspectos de operación que son variables en el tiempo) [16][28]. En particular, este proyecto agrega a un modelo dinámico existente [16], características recientemente introducidas a los sistemas de transporte público (concretamente, información en tiempo real a los usuarios), por lo tanto su estudio es de relevancia. Como marco específico, este proyecto se relaciona con el proyecto LACCIR<sup>1</sup> "Modeling and simulation of passenger trips in transit systems under real-time information services".

Este proyecto de grado toma como insumo principal, el simulador construido en el proyecto de grado "Herramientas para la simulación del transporte público urbano colectivo" [16], el que a su vez se basa en el proyecto de grado "Simulador de transporte público urbano colectivo" [28]. En dicho simulador se modela la interacción de los pasajeros con los ómnibus, dado un diseño del sistema de transporte público, un escenario particular de demanda de pasajeros y una determinada configuración de líneas y frecuencias. Más precisamente, permite modelar diferentes comportamientos de los pasajeros en cuanto a la elección de líneas.

## **1.2. Objetivos**

Los objetivos de este proyecto apuntan a conocer los diferentes servicios de información en tiempo real orientados a usuarios de sistemas de Transporte Público Urbano Colectivo, de aquí en más TPUC, y a modelar dichos sistemas de forma de poder adquirir conocimientos sobre el impacto de aquellos servicios en los TPUC.

Se pretende obtener experiencia en el modelado e implementación de un sistema complejo y la posterior experimentación con el mismo, aplicando la metodología de la Investigación Operativa, extendiendo las herramientas existentes elaboradas en distintos proyectos de grado del Departamento de Investigación Operativa de años anteriores.

## **1.3. Resultados esperados**

- Relevamiento de los servicios de información en tiempo real a usuarios de sistemas de transporte público, disponibles tanto en la región, como a nivel mundial.
- Estudio de las principales metodologías para modelar dichos sistemas bajo la presencia de tales servicios.
- Diseño e implementación de un prototipo de software de simulación que permita experimentar con casos de estudio reales, en los que se modele la interacción de pasajeros del sistema de transporte con los servicios previamente relevados.
- Reporte y discusión de resultados de experimentación con dichos casos de simulación.

---

<sup>1</sup> LACCIR: Latin American and Caribbean Collaborative ICT Research



## **1.4. Estructura del informe**

El informe a continuación se estructura de la siguiente forma: en el capítulo 2 se dará un marco teórico, presentando los conceptos que se necesitan conocer a la hora de hablar de simulación a eventos discretos y sistemas de transporte colectivo. En el capítulo 3 se presenta un estudio de algunos sistemas representativos de información a usuarios de transporte colectivo a nivel regional y mundial. Luego, en el capítulo 4 se especificarán decisiones de diseño tomadas en la construcción del simulador de eventos discretos implementado; en particular se explica en detalle la implementación de diferentes escenarios correspondientes al comportamiento de los usuarios bajo diferentes grados de información en tiempo real de acuerdo a los servicios recabados a partir del capítulo previo. En el capítulo 5 se presentarán los resultados de la experimentación con tablas y gráficos que permitirán extraer las conclusiones. Finalmente, el capítulo 6 presenta conclusiones generales del proyecto y trabajos futuros.

Además, se presentan tres apéndices con información extra. En el Apéndice A se detallan las fichas de estudio de los servicios de información relevados, de una forma estandarizada. En el Apéndice B se describen los archivos de salida del simulador a partir de los cuales se obtienen resultados de los experimentos. En el Apéndice C se describen las particularidades de los datos de entrada para el simulador, correspondientes al caso de estudio utilizado.



## 2. Marco Teórico

### 2.1. Antecedentes

Como base teórica sobre modelos de transporte público, se estudiaron diversos artículos representativos, que introdujeron a una primera noción para el modelado del comportamiento de pasajeros en dichos sistemas.

Luego de una primera búsqueda en amplitud de literatura relacionada, en conjunto con el supervisor del proyecto se seleccionaron dos artículos representativos, los cuales fueron estudiados en detalle. Éstos fueron “Optimal strategies: a new assignment model for transit networks” de Spiess y Florian [26] y “Effect of real time transit information on dynamic path choice of passengers” de Cats, Koutsopoulos, Burghout y Toledo [10].

Ambos artículos se basan en un modelo de representación del servicio de transporte público (modelo de red) y un modelo de comportamiento. Este último asume que los pasajeros son entidades racionales que siempre buscan optimizar algún criterio (por ejemplo el tiempo total de viaje) en base a la información que disponen.

#### 2.1.1. Estrategias

Spiess y Florian introducen el concepto de *estrategias* a la hora de modelar las alternativas para viajar en transporte público [26]. Una estrategia se define como un conjunto de reglas que aplica el pasajero para llegar a su destino. Los autores formulan el problema de optimizar esta estrategia, proponiendo además algoritmos de resolución. En este caso, no se maneja el concepto de acceso a información en tiempo real específicamente, pero se marca la incidencia de la disponibilidad de mayor información en la generación de estrategias más complejas para modelar al pasajero.

El modelo propuesto en este trabajo, asume que el pasajero tiene información perfecta y es capaz de optimizar en base a ella. Esto implica que el pasajero debería ser capaz de resolver un modelo de optimización lineal (que minimiza el tiempo total para llegar desde el origen al destino del viaje), el cual es complejo de resolver de forma manual (si asumimos que el pasajero no utiliza herramientas de optimización para planificar el viaje) e incluso es complejo de implementar en los casos donde se busca incluir esa funcionalidad en una herramienta de software.

Es entonces que para facilitar la implementación de estos modelos, se sugieren variantes del mismo, en donde el pasajero no será un perfecto optimizador. El modelo de pasajero que se presentará en este Proyecto de Grado es una variante sencilla de estos pasajeros “no perfectos”, donde se intenta hacer un modelado más realista adecuándose al contexto de la realidad concreta utilizada en los experimentos.

### 2.1.2. Información en tiempo real

En “Effect of real time transit Information on dynamic path choice of passengers” se propone el estudio de la incidencia de la información en tiempo real en las decisiones de recorridos por parte del pasajero [10]. Para eso, se propone la construcción de un modelo de transporte público y de tráfico en donde se considera el progreso del pasajero en la red como una secuencia de decisiones discretas, en las cuales el pasajero evaluará sus expectativas sobre los tiempos de viaje de las distintas opciones. Estas decisiones se ven condicionadas por los distintos escenarios de acceso a la información en tiempo real. Los viajes de transporte público implican la toma de decisiones de recorridos, basado en los conocimientos previos del pasajero, y la disponibilidad de información en tiempo real. La evaluación de la influencia de la información en tiempo real requiere un modelo dinámico de transporte público (a diferencia del modelo de Spiess y Florian, que es estático) y decisiones de recorridos por parte del pasajero. El modelo debe de ser detallado y completo, y requiere calibrar sub-modelos que dependen de cada caso al que se aplique, lo que implica información y procesos extra previos. En el estudio experimental de este trabajo, se empleó una red de metro, chica, como realidad sobre la cual aplicarlo. Debido a la naturaleza de esta realidad, no se aprecia el efecto de la superposición de líneas en los resultados obtenidos.

Se denomina superposición de líneas, al caso en que varias líneas pasan por la parada origen y por la parada destino, por lo que todas son potencialmente útiles para que el pasajero pueda llegar de origen a destino, subiéndose a un ómnibus de cualquiera de esas líneas.

El caso de estudio es la red de metro de Estocolmo y los resultados arrojados por este trabajo indican que proveer una información en tiempo real más completa tiene el potencial de conducir a cambios de ruta que ahorren tiempo. Se presume que la aplicación del modelo en una red más extensa producirá mayores ganancias. El experimento sugiere a los operadores proveer información en tiempo real en las estaciones (paradas) de forma de producir una ganancia de tiempo. Proporcionar información en tiempo real puede ayudar y apoyar a los pasajeros en decisiones, de forma de reducir el nivel de incertidumbre asociado al uso del sistema de transporte. El suministro de información específica en los distintos momentos del viaje, informa acerca de las condiciones inusuales, y ayuda al pasajero a conocer otras alternativas menos familiares.

La literatura presenta varios modelos de comportamiento de pasajeros, con diferentes grados de sofisticación; generalmente son complejos de entender e implementar (por ejemplo [10]). Estos modelos tienen altos costos computacionales, haciendo casi imposible su ejecución en ciudades grandes e incluso medianas, así como también tienen grandes requerimientos de datos y calibración previa.

## 2.2. Modelado de sistemas de transporte público

Se presentan los diferentes conceptos utilizados a lo largo de este proyecto, respecto al modelado de sistemas de transporte público. Al igual que en [26], [10], representaremos el sistema mediante un modelo de red de servicios y uno de comportamiento de pasajeros sobre dicha red.

### **2.2.1. Modelo de red**

El modelo de red de este proyecto de grado parte de los modelos propuestos y utilizados en los proyectos de grado de [16] y [28]. A continuación se definen los conceptos utilizados durante el desarrollo del informe.

#### **Red Vial, Nodos Viales y Tramos**

La red de transporte modelada es representada con un grafo de nodos y aristas.

En este grafo los nodos (denominados nodos viales) representan intersecciones o cruces de calles, centroides (definidos a continuación) o paradas de ómnibus. Las aristas representan tramos de calles que conectan los nodos. Estos tramos incluyen costos, en particular se asocia el costo de un tramo al tiempo requerido para atravesarlo.

El grafo que representa la red vial no es único. En [36] se puede ver que una misma red física se representará de diferentes formas en un grafo según el nivel de detalle que quiera utilizarse.

#### **Centroide**

Los centroides representan zonas geográficas concentradas lógicamente en un punto sin correspondiente geográfico real. El origen y el destino del tráfico de pasajeros en el modelo, siempre será indicado por el centroide origen y el centroide destino del mismo (también conocido como “par O-D”). En la figura 2.1 se pueden ver marcados como triángulos, indicados como Origin y Destination.

#### **Demanda**

La demanda representa la frecuencia de viajes requeridos por las personas (habitantes) entre distintas zonas de la región de estudio. Se modela como una matriz origen-destino que registra en cada pareja  $ij$  la frecuencia de salidas desde la zona  $i$  hacia la zona  $j$ . Los valores de la matriz expresan la cantidad de viajes realizados para dicha pareja O-D por unidad de tiempo, para un intervalo de tiempo determinado. Se debe tener en cuenta que los valores representados pueden diferir en caso de que se desee modelar el sistema en hora de alta afluencia, o fuera de ella.

## Frecuencia

La frecuencia es una forma de expresar cada cuánto tiempo hay una salida de un ómnibus de una línea. Las frecuencias se definen como una lista de pares de identificadores de línea y período (inverso de la frecuencia, expresado en unidades de tiempo).

## Tabla de horario

La Tabla de horario es una forma de definir específicamente en qué momento hay una salida de un ómnibus de una Línea. Se define como una tabla para cada recorrido, en la cual cada fila representa una salida y cada columna representa el horario de llegada a cada parada. El horario de las salidas queda definida en la primer columna de la tabla. Se manejan tablas estáticas y dinámicas, siendo las primeras, tablas que no modifican los valores de sus celdas y las segundas, tablas que se modifican según el horario real en el cual llega un ómnibus a una parada.

## Caminata

Las caminatas representan conexiones posibles de los pasajeros para trasladarse de un centroide a una parada (y viceversa), o desde una parada a otra. Así como los tramos, estas caminatas se asocian a costos relativos al tiempo que le lleva a un pasajero realizarla. En la figura 2.1 se pueden ver representadas como flechas punteadas.

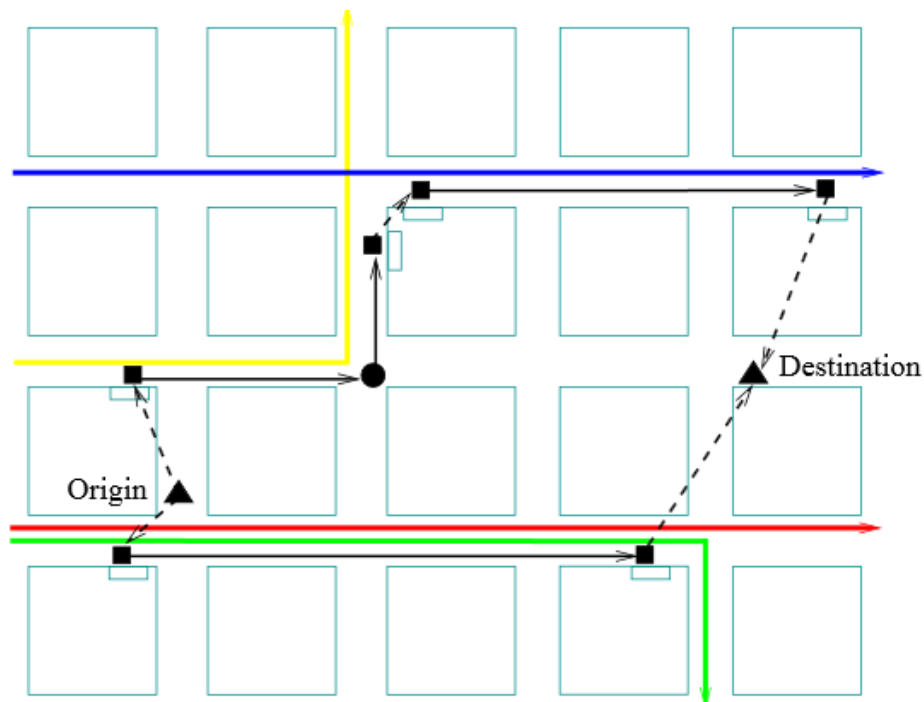


Figura 2.1 Representación de los diferentes elementos del modelo. [22]

## Línea y Recorrido

Una secuencia de nodos y aristas representa un recorrido. Cada línea de ómnibus tendrá uno o dos recorridos según se correspondan a líneas que realizan recorridos circulares, o líneas con recorrido de ida y recorrido de vuelta. En la figura 2.1 se pueden ver representadas como flechas de colores. En la figura 2.2 se pueden ver como líneas de colores.

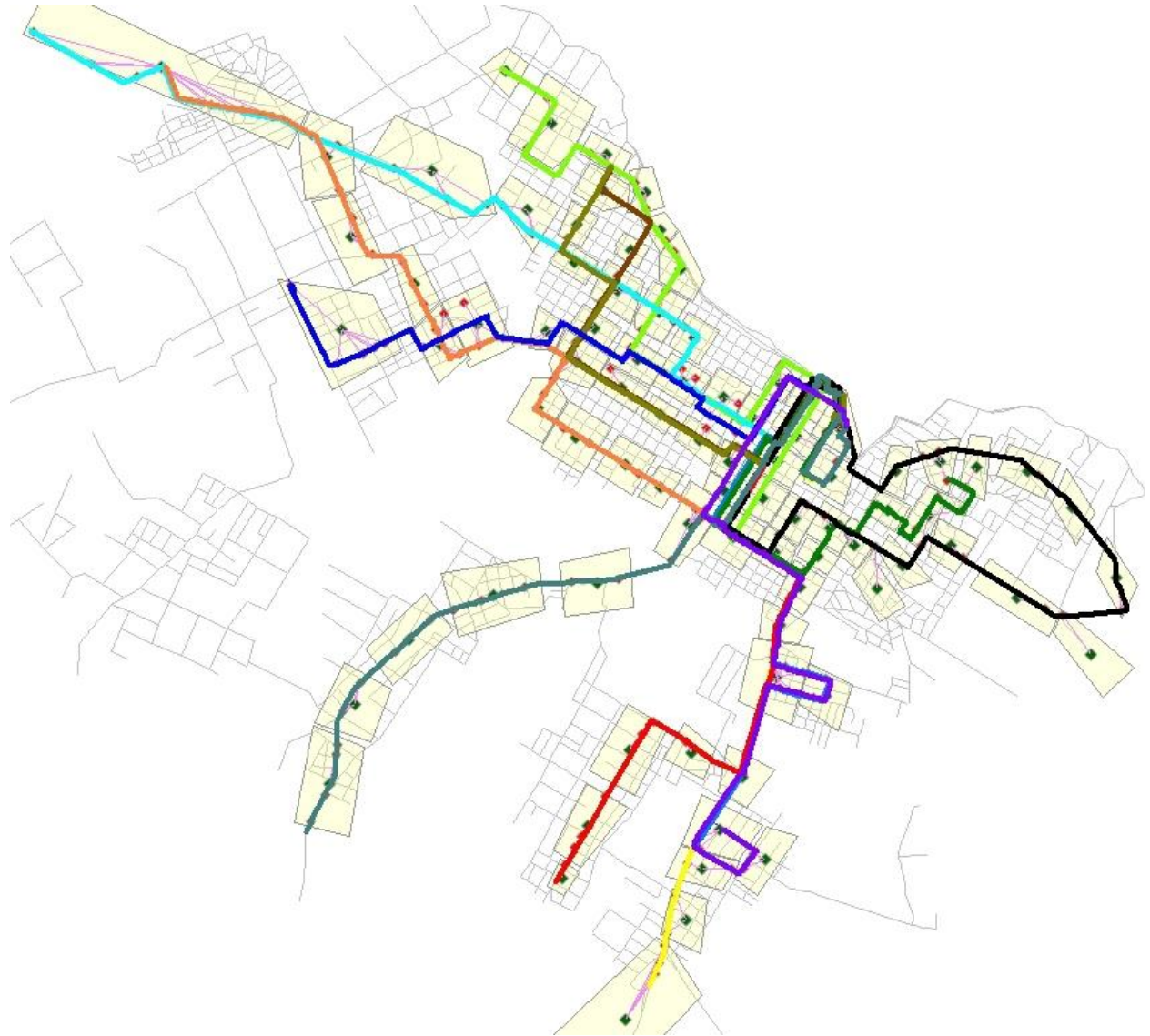


Figura 2.2 Representación de la ciudad de Rivera en IgorTp [16]

## Parada

Las paradas son nodos dentro del recorrido de una línea, en donde los pasajeros podrán abordar o descender del ómnibus. En la figura 2.1 se pueden ver representadas como cuadrados negros.

### 2.2.2. Modelo de comportamiento de pasajeros

Los modelos de comportamiento indican los supuestos e hipótesis que se asumen en el comportamiento de un pasajero en el sistema de transporte.

El pasajero deberá tomar decisiones según las posibilidades que se le presenten a lo largo de su viaje, ya que entre su centroide origen y destino puede existir más de un recorrido utilizando una línea o más de una, en el caso de que se permita hacer transbordos. El pasajero tomará su decisión según la estrategia que tenga definida a priori, utilizando la información del modelo. Esta información incluye los recorridos y la frecuencia o tablas de horario según el modelo.

Identificamos dos etapas distintas en la estrategia. La primera de ellas, llamada *pre-trip*, comprende las decisiones del pasajero antes de iniciar el viaje. Incluye la comparación de distintos recorridos y la selección de uno de ellos (o varios) en función de la información que cuenta en ese momento y los criterios de selección que emplee. La siguiente es denominada *on-trip*, que engloba las decisiones del pasajero durante el viaje. Describe cómo el pasajero reacciona ante los eventos desconocidos o imprevistos que experimenta en el viaje. A su vez, las estrategias se pueden categorizar en dos tipos: indiferentes, cuando el pasajero aborda el primer ómnibus que pasa por la parada y le lleva a destino, o inteligente, cuando al pasar un ómnibus que le sirve para llegar a destino, lo compara con los otros ómnibus que están por llegar y lo llevan a destino [1].

Los modelos de comportamiento de pasajeros son fundamentales porque permiten obtener métricas de performance del sistema. Estas métricas refieren a aspectos experimentados por los pasajeros (tiempos de viaje, niveles de confort), para quienes se está planificando el sistema de transporte público.

### 2.2.3. Simulación a eventos discretos

La simulación de sistemas generalmente refiere a la construcción de un modelo abstracto que representa algún sistema de la vida real [30]. La simulación describe los aspectos pertinentes del sistema como una serie de ecuaciones, relaciones y/o sentencias lógicas embebidas en un programa.

Usualmente, se utiliza la simulación cuando:

- El sistema a simular no existe aún.
- Experimentar con el sistema es costoso.
- Experimentar con el sistema es inapropiado.

Al momento de modelar un sistema a simular es necesario ver cuáles son los objetivos del estudio, para así seleccionar qué elementos se modelará efectivamente y cuáles carecen de importancia o son irrelevantes.



Los propósitos de realizar una simulación pueden ser:

- De comparación: dos ejecuciones de una simulación pueden ayudar a ver el efecto de cambiar una variable de decisión. Las variables de decisión son entradas bajo el tomador de decisiones, que influyen en las salidas, por ejemplo la frecuencia de cada línea.
- De predicción: una simulación puede ser usada para predecir el estado de un sistema en un punto futuro.
- De investigación: algunas simulaciones pueden ser construidas de forma de proveer un pantallazo del sistema en lugar de realizar una experimentación detallada.

Por otro lado, desde un punto de vista diferente se puede hablar de tres tipos de simulaciones, las estadísticas, las continuas y las discretas. En el caso de este proyecto se trabajará con la simulación a eventos discretos, que refiere a la modelización de sistemas que pueden ser representados por una serie de eventos. La simulación describe cada evento en concreto, pasando de uno a otro como un avance en el tiempo. Los sistemas modelados son dinámicos y, casi siempre, estocásticos, ya que no se sabe de antemano cómo se comportará el sistema aunque se pueden predecir sus variaciones.

Los objetos o individuos cuyas actividades se quieren modelar son representados por *entidades* [30], en el caso de este proyecto las entidades son los pasajeros y los ómnibus (ver sección 2.2.1). Los objetos que no tienen atributos pero actúan como restricciones a las actividades de las entidades son llamados *recursos*, por ejemplo un nodo vial (ver sección 2.2.1).

Según la metodología de SED los cambios de estado en las entidades ocurren en puntos discretos del tiempo, que son llamados eventos. Hay dos tipos de eventos:

- Evento agendado (B event, bound): su ocurrencia es predecible y puede ser agendado.
- Evento condicional (C event): su ocurrencia depende de ciertas condiciones.

La simulación comienza en el tiempo cero, y ejecuta todos los eventos en el orden en el cual ocurren, hasta que se cumple alguna de las siguientes condiciones:

- No hay más eventos que ejecutar.
- El tiempo de ejecución del próximo evento supera el máximo estipulado para la simulación.
- Se ejecutó un evento que pone fin a la simulación.

La naturaleza estocástica del sistema de transporte que se quiere simular necesita que los datos sean muestras de una distribución que se aproxime a la realidad [30]. Por ejemplo el arribo de un ómnibus a un nodo vial necesita ser una muestra de una distribución normal de media igual al peso de la arista que se está transitando. Como consecuencia esto las salidas de la simulación también van a ser muestras de una distribución.

Para sortear una muestra de una distribución se necesitan secuencias de números aleatorios. Cómo es costoso obtener números realmente aleatorios, en computación se utilizan generadores de números pseudo-aleatorios, los cuales son obtenidos de fórmulas y aparentan ser

impredecibles e independientes unos de otros. Estas fórmulas necesitan de semillas, que cambian de experimento en experimento.

Generalmente la construcción de un modelo de simulación a eventos discretos es costosa (diseño, implementación y validación) pero a veces es la alternativa más apropiada para obtener métricas de performance para cuyo cálculo se debe tener un modelado explícito de los cambios de estado del sistema según el avance del tiempo y la ocurrencia de eventos relevantes.

### 3. Servicios de información a usuarios de transporte público

En esta sección se describirán los distintos servicios de información a usuarios de sistemas de transporte público metropolitano, relevados durante el transcurso del proyecto, tanto nacionales como extranjeros.

Dentro del estudio se analizó a los servicios de acuerdo a su manejo de información en tiempo real, y a la accesibilidad a los mismos en las diferentes etapas del viaje (*pre-trip*, *on-trip*). Además dentro de los mismos se categorizan según si usa frecuencia o tablas de horario, si provee información sobre transbordos, si es personalizable, y si muestra la posición actual o el recorrido

Mayoritariamente los servicios estudiados son aquellos accesibles por la web, lo que hace a los mismos accesibles tanto en el pre-trip como en el on-trip mediante dispositivos móviles.

#### 3.1. Servicios nacionales

Los servicios nacionales estudiados, están orientados exclusivamente al sistema de transporte de ómnibus capitalino. La mayoría de los mismos trabaja según los datos abiertos brindados por la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) [31].

##### Solo Bus

*Solo Bus* [32] es una aplicación para dispositivos móviles Android [2]. Ésta muestra un mapa según las coordenadas determinadas por el GPS<sup>2</sup> del dispositivo, a partir del cual el usuario indica la parada por la cual desea consultar y se muestran los próximos arribos de las distintas líneas de la parada. Los datos de esta aplicación no son en tiempo real, son actualizados regularmente con los datos abiertos de la IMM [31].

##### STM Montevideo

*STM Montevideo* [34] es una aplicación para dispositivo móvil. En la misma, el usuario indica la línea por la que desea consultar y el sistema le muestra la tabla de horarios estática de la misma. Utiliza el conjunto de datos abiertos de la IMM.

##### Como Ir

*Como ir* [6] es un sistema web provisto por la IMM, de libre acceso. En la página el usuario puede consultar al sistema dando dos puntos (origen y destino), para que le sugiera la línea (o las

---

<sup>2</sup> Global Positioning System o sistema de posicionamiento global.

líneas) que lo conectaran, indicando además a qué hora pasarán por su parada candidata. Los datos de esta aplicación son basados en los datos abiertos de la IMM que son estáticos.

### A qué hora pasa

Así como Como ir, *A qué hora pasa* [3] es un servicio provisto por la Intendencia de Montevideo. *A qué hora pasa* funciona como aplicación de dispositivo móvil, en la que el usuario indica una parada y el sistema le indica los próximos arribos a la misma. Los datos son estáticos.

### Montevideo Bus

*Montevideo Bus* [23] es una página web de libre acceso. En dicha web el usuario puede indicar su origen y destino, y el sistema sugiere el mejor recorrido optimizando la distancia recorrida. *Montevideo Bus* fue una de las primeras web disponibles relativas al sistema de transporte, y no ofrece información relativa a horarios.

### iBus

*iBus* [17] es un servicio de consulta al sistema de transporte, realizado por Movistar Uruguay [24] y CUTCSA [8], mediante el cual un usuario del sistema de telefonía Movistar puede enviar un SMS<sup>3</sup> indicando la línea por la que desea consultar y el sistema le responderá cuanto tiempo falta para su arribo a la parada más cercana (que se calculará según la posición reportada por el dispositivo móvil a las antenas de la empresa). Cada consulta incluirá un costo económico al usuario. Al momento, es el único servicio que provee información dinámica.

## 3.2. Servicios Extranjeros

### Société de transport de Montréal

*Societe de transport de Montreal* [33] es una web canadiense para información en tiempo real del sistema de transporte, tanto de ómnibus como de metro. En la web se eligen el origen, el destino y la hora de partida o arribo. El sistema muestra los resultados de diferentes recorridos posibles. Se describe totalmente los transbordos necesarios.

### MonTransit (STM, Bixi)

*MonTransit* es una aplicación canadiense para dispositivos móviles, pensada tanto para el transporte en ómnibus, metros, trenes y bicicletas. En la misma se selecciona una parada, y muestra los próximos arribos de todas las líneas que pasan por ella. Se selecciona una línea, muestra las paradas más cercanas y muestra los arribos de esa línea en esa parada.

---

<sup>3</sup> Short Message Service o mensajes de texto.

## Consortio Transportes :: Madrid

*Consortio Transportes Madrid* [7] es un portal web español, de consulta sobre el sistema de transporte de ómnibus, trenes, metro, etc. En la web se selecciona el origen y el destino, utilizando direcciones o lista de puntos de interés, se selecciona el método de transporte y el sistema muestra las instrucciones de que línea utilizar y los tiempos de arribo basado en la longitud del recorrido.

## Madrid Transportes

*Madrid Transportes* [21] funciona como una aplicación de Android [2]. Dicho sistema está orientado al sistema de transporte de ómnibus. El sistema provee al usuario de líneas y paradas para seleccionar, a partir de las cuales calcula distancias y tiempos de espera en tiempo real.

## Zaragoza Rutas

El Ayuntamiento de Zaragoza [5] provee la aplicación para dispositivos móviles *Zaragoza Rutas* [4], orientando tanto al sistema de transporte de ómnibus como al de trenes. El sistema provee al usuario de recorridos y paradas, para seleccionar, a partir de las cuales calcula distancias y tiempos de espera en tiempo real.

## London Transport App

*London Transport* [20] es una aplicación Android pensada en el sistema de transporte en general de Londres. La aplicación muestra recorridos y estados actuales de metros, trenes y ómnibus, facilitando la planificación de un viaje óptimo. Además, esta aplicación permite pagar peajes o llamar taxis.

## Live train map for the London Underground (LTMLU)

*Live train map for the London Underground* [19] es una web construida a partir de datos abiertos del sistema de trenes de Londres. La web muestra la posición de los trenes según el calculado por la tabla de horarios y distancias.

## Google Maps Transit

El portal de *Google Maps* [14], entre tantas de sus funcionalidades provee información del sistema de metros de algunas ciudades como Nueva York y México D.F. Dado un mapa de con las estaciones de metro y las líneas de metro, si se selecciona una de ellas se despliega la información horaria de los próximos arribos.

Google ofrece un servicio con el cual se puede alimentar la aplicación *Google Maps Transit* [15] con información en tiempo real utilizando el formato GTFS-realtime [37] lo que facilita la adhesión de nuevas ciudades al programa.

## One Bus Away

*One Bus Away Project* [25] es tanto una web como una aplicación para dispositivos móviles que provee información del sistema de transporte en general en varias ciudades de Estados Unidos. El usuario selecciona una parada de un mapa y se muestra la información de las líneas que pasan por allí, detallando el horario estipulado por las tablas de horarios, así como el retraso puntual de cada una.

### 3.3. Observaciones

Los servicios locales muestran solamente información relativa a la flota de ómnibus y se centran en mostrar de diferentes formas a qué hora deberían pasar los ómnibus de cada línea por una parada específica, y para lograrlo la mayoría utiliza los datos abiertos de la IMM. Además de la tabla de horarios, los datos abiertos de la IMM incluyen la ubicación de las paradas y los recorridos de las líneas. En general, los servicios locales relevados no presentan información en tiempo real sino la tabla de horarios estática aportada por las distintas compañías. El único servicio que muestra datos en tiempo real es iBus, pero solo para una compañía de transporte. Solo dos sugieren estrategias de transporte: una basada en menor hora de arribo a destino según la tabla estática [6] y otra basada en distancia recorrida [23].

Los servicios extranjeros muestran información de diferentes medios de transporte urbano colectivo, como ómnibus, trenes y metro. En la mayoría de los servicios presentados se dispone de información en tiempo real, accesible en todas las etapas del viaje. Muchos servicios combinan diferentes tipos de información, como tablas de horarios actualizadas en tiempo real y frecuencias, así como también información sobre el estado global del sistema de transporte. También algunos sugieren transbordos y planifican viajes usando tanto líneas de metro como de ómnibus para trazar la ruta sugerida al usuario.

En la Tabla 3.1 se muestran las características relevantes de los servicios estudiados. Se muestra si el servicio utiliza información en tiempo real (RTI), si el servicio utiliza tablas de horario (TH), si estima la duración de los recorridos según la distancia (EST), si es una página web (web) o si es una aplicación para dispositivos móviles (app).

	RTI <sup>4</sup>	TH <sup>5</sup>	EST <sup>6</sup>	web	app
Solo Bus		✓			✓
STM Montevideo		✓			✓
Como Ir		✓		✓	
A qué hora pasa		✓			✓
Montevideo Bus			✓	✓	
iBus	✓				
S.T. Montréal	✓	✓		✓	
MonTransit	✓				✓
Consortio Transportes			✓	✓	
Madrid Transportes	✓				✓
Zaragoza Rutas	✓				✓
London Transport	✓	✓			✓
LTM LU	✓		✓	✓	
Google Maps Transit	✓	✓		✓	✓
One Bus Away	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 3.1 - comparativa de los servicios relevados

<sup>4</sup> Real Time Information, Información en tiempo real.

<sup>5</sup> Tabla de horarios.

<sup>6</sup> Tiempo de viaje estimado por distancia.





## 4. Modelo de simulación de transporte público

### 4.1. Introducción

Parte de este proyecto propone la modificación del simulador a eventos discretos PublicTransport construido por Aldaz y De León en el año 2010 [28] en su versión 1.0 y modificado por López, Lorenzo y Medina en el año 2012 [16] en su versión 2.0. Este trabajo se basó en la versión PublicTransport 2.0.

El simulador permite representar dinámicamente un sistema de transporte público, es decir, los cambios de su estado según el avance del tiempo. Pero también es un modelo estocástico, por lo tanto, la generación de demanda (aparición de pasajeros con requerimientos de viaje) así como el movimiento de los ómnibus (a través de la red que tiene la estructura de la figura 2.1 del capítulo 2) están modeladas con distribuciones de probabilidad. Eso permite incluir variabilidad en la evolución del sistema, la que es capturada (en cierto sentido) por la información en tiempo real. De esa forma, el sistema se retroalimenta, dado que el comportamiento de los usuarios se ajusta al comportamiento concreto (muestras de las variables aleatorias) de los ómnibus. El resultado de esa interacción es lo que se quiere observar, medir, para obtener una estimación del impacto de la disponibilidad de información acerca de unos elementos del sistema por parte de otros.

PublicTransport modela la interacción de pasajeros con ómnibus, dado un diseño de sistema de TPUC, un escenario particular de demanda y una configuración de líneas y frecuencias. Más específicamente, se modela el recorrido de los ómnibus a través del sistema de nodos viales y el comportamiento de los pasajeros al elegir las líneas a utilizar según el escenario de demanda.

Los pasajeros eligen los ómnibus a utilizar según las estrategias que les fueron asignadas al momento de creación. Se entiende por estrategia a un conjunto de reglas que, al ser aplicadas, permiten al viajero arribar a su destino [26]. Cada estrategia provee la lógica del comportamiento de los pasajeros a lo largo de la simulación por lo tanto, es importante estudiarla y definirla detalladamente [16]. PublicTransport 1.0 contempla una sola estrategia, que es la estrategia directa, mientras que PublicTransport 2.0 agrega la estrategia con transbordo (ver sección 5.2. Elección de nuevas estrategias).

La modificación realizada en este proyecto, consiste en agregar soporte para nuevas estrategias, en las cuales los pasajeros toman decisiones basadas en información en tiempo real sobre el estado del sistema. Cada estrategia implementada, modela un tipo o tecnología de información en tiempo real. Además, para lograr agregar el modelo de información en tiempo real, se requirió modificar algunos elementos del núcleo del simulador, como lo es el cambio del modelo de salidas de los ómnibus de frecuencias a tablas de horario.

## 4.2. Modelos de comportamiento de pasajeros

El simulador tomado como punto de partida, modela el comportamiento del pasajero dentro de un sistema de transporte público, a partir de dos estrategias. En la primera, denominada estrategia directa, se tomó como supuesto que el pasajero al llegar a la parada se toma el primer ómnibus que arribe y que lo lleve directamente al destino, descartando otros posibles arribos. En la segunda, denominada estrategia con transbordo, a diferencia de la primera, el pasajero contempla dentro de sus opciones subir a algún ómnibus que no le lleve directamente a destino, pero que sí pueda acercarlo a otra parada cercana al centroide destino, donde existe otro ómnibus que puede llevarlo a destino en menor tiempo.

A partir del relevamiento realizado sobre los servicios de información en tiempo real (capítulo 3), se identificaron distintos escenarios o comportamientos, según el momento del viaje en el que se tiene acceso a la información en tiempo real sobre el sistema de transporte. Se decidió modelar los seis que parecieron más representativos, tomando en consideración que el sistema de transporte es exclusivamente de ómnibus en el medio urbano. También se tuvo en cuenta el sentido común y el conocimiento sobre la idiosincrasia local para identificar los aspectos que potencialmente tienen más influencia en el comportamiento de los usuarios de transporte público cuando disponen de distintos grados de información. Notar que además de asumir que los usuarios tienen información sobre el sistema, además se podría asumir que tienen acceso a herramientas que sugieren la mejor forma de realizar el viaje, como las descritas en [38]. No es el caso de los modelos propuestos en este trabajo.

La información accesible por parte de los usuarios es entonces (además de los trazados de recorridos) los tiempos de arribo de los ómnibus a las distintas paradas de su recorrido. Estos datos son estimados según la planificación de su salida de origen (tabla de horarios estática) y los tiempos estimados de viaje entre dos paradas consecutivas (costos de los arcos que representan tramos en la red, ver sección 2.2.1), los cuales se actualizan a medida del avance del ómnibus por el recorrido. Estos tiempos no son fijos, ya que varían según distribuciones de probabilidad que en la sección 4.4 se explicarán más en detalle.

Las estrategias propuestas e implementadas son:

- Acceso constante a la información en tiempo real sobre todas las líneas.
- Acceso a la información en tiempo real solamente en las paradas.
- Acceso a la información en tiempo real solo en centroide origen (pre-trip).
- Acceso a la información en tiempo real solo sobre una única línea.
- Sin acceso a la información en tiempo real, dos variantes: (1) ponderando por frecuencia y (2) usando la tabla de horarios estática.

Ninguna de las estrategias elegida considera transbordos, aspecto que quedó por fuera del alcance del proyecto por la complejidad (tanto de modelado como de implementación) que implica. Tampoco se consideró en el comportamiento del pasajero, el cambio de parada mientras espera por un ómnibus.

Cuando se refiere a las paradas de los centroides (tanto origen como destino), se refiere a las paradas conectadas a dichos nodos según el modelo de la sección 2.2.1, figura 2.1.

A continuación se especifican detalladamente cada una de las mismas.

#### **4.2.1. Acceso constante a la información sobre todas las líneas (Modelo 1)**

Este caso representa el acceso a la información en tiempo real en todas las etapas del viaje, y sobre toda la flota del sistema de transporte. Esta estrategia simula la utilización de un dispositivo móvil con acceso a internet donde el pasajero puede evaluar todas las posibilidades con información en tiempo real antes de salir de su casa, o en parada.

##### **Especificación**

1. El pasajero accede en su centroide origen a la información en tiempo real sobre el sistema de transporte.
2. El pasajero busca la parada de su centroide por la que pasa el ómnibus tal que, puede llegar a la parada antes de que el ómnibus pase por ella, y el tiempo de llegada a la parada del ómnibus más el tiempo de viaje hasta el centroide destino, es el menor comparándolo contra los otros ómnibus del sistema.
3. El pasajero considera un tiempo prudente para la llegada a la parada antes que el ómnibus, y planifica su salida.
4. El pasajero sale de su casa y llega a la parada.
5. Al llegar a la parada un ómnibus que le sirve, el pasajero consulta si en ese momento no existe otro ómnibus que pasa por dicha parada y su tiempo de arribo más el tiempo de viaje a una parada del centroide destino, es menor que el tiempo de viaje que el ómnibus en parada. Si existe, decide no tomar el ómnibus en parada y espera al candidato; de no existir, toma el ómnibus de la parada. De haber varios ómnibus en parada y no existir otro candidato con menor tiempo, sube al que lo lleve en menos tiempo.
6. El ómnibus llega a la parada destino, el pasajero baja y camina al centroide destino.

#### **4.2.2. Acceso a la información solo en origen (Modelo 2)**

Este modelo surge de limitar el acceso a la información en tiempo real, solo para el momento que el pasajero se encuentra en el origen (pre-trip). La utilización de esta estrategia simula la situación en que el pasajero planifica desde su hogar el viaje accediendo a un sitio web (o similar, se asume que no dispone de dispositivo móvil) el cual le provee de la información deseada. Elige de esta forma la parada más conveniente y luego toma el primer ómnibus que le sirva que pase por dicha parada.

##### **Especificación**

1. El pasajero accede en su centroide origen a la información en tiempo real sobre el sistema de transporte.

2. El pasajero busca la parada de su centroide por la que pasa el ómnibus tal que, puede llegar a la parada antes de que el ómnibus pase por ella, y el tiempo de llegada a la parada del ómnibus más el tiempo de viaje hasta el centroide destino, es el menor comparándolo contra los otros ómnibus del sistema.
3. El pasajero considera un tiempo prudente para la llegada a la parada antes que el ómnibus, y planifica su salida.
4. El pasajero sale de su casa y llega a la parada.
5. Al llegar a la parada un ómnibus, si pertenece a la línea que esperaba se sube, en el caso contrario lo deja pasar.
6. El ómnibus llega a la parada destino, el pasajero baja y camina al centroide destino.

#### 4.2.3. Acceso a la información para una única línea (Modelo 3)

La estrategia en cuestión simula el comportamiento de un pasajero que utiliza un servicio que le brinda información en tiempo real, en cualquier momento del viaje, sobre una única línea candidata. Esta línea candidata el pasajero la elige comparando en su origen entre el peor caso para cada línea. Esta comparación asume que el pasajero conoce los tiempos de viajes de cada línea candidata hacia su destino, a los que le suma el período de la línea (inverso de la frecuencia de salida de la línea) para elegir la que demore un tiempo menor.

Una vez elegida la línea el pasajero puede consultar en origen cuando pasará exactamente el ómnibus, pudiendo así planificar su salida minimizando el tiempo de espera en parada.

Al llegar a la parada elegida, el pasajero puede volver a consultar al servicio por la línea elegida, de modo de considerar posibles atrasos o adelantos respecto a su consulta inicial.

##### Especificación

1. El pasajero se encuentra en el centroide origen.
2. Busca la parada por la que pasa el ómnibus tal que, el tiempo de caminata a la parada del ómnibus más el peor tiempo de espera y el tiempo de viaje hasta la parada destino, es el menor comparándolo contra los otros ómnibus del sistema.
3. El pasajero consulta la información en tiempo real sobre la línea elegida. Considera un tiempo prudente para la llegada a la parada antes que el ómnibus, y planifica su salida.
4. El pasajero sale de su casa y llega a la parada.
5. Al llegar a la parada, el pasajero vuelve a consultar la información en tiempo real sobre la línea elegida y recuerda este dato para posteriores comparaciones.
6. Al llegar a la parada un ómnibus, si el mismo pertenece a la línea elegida se sube. En caso de que no sea un ómnibus de la línea elegida pero que le sirva para llegar a una parada del centroide destino, el pasajero compara si el tiempo de viaje en este ómnibus es menor que el tiempo total de viaje calculado para la línea elegida al llegar a la parada. Si el tiempo de viaje es menor, se sube al ómnibus de la parada, sino continúa esperando el ómnibus elegido previamente.
7. El ómnibus llega a la parada destino, el pasajero baja y camina al centroide destino.

#### 4.2.4. Sin información usando tabla de horarios estática (Modelo 4)

En esta estrategia el pasajero carece de acceso a la información en tiempo real, por lo que planificará su viaje desde el origen, a partir de la tabla de horarios estática del sistema de transporte.

##### Especificación

1. El pasajero accede en su centroide origen a la tabla de horarios estática del sistema de transporte.
2. El pasajero busca la parada de su centroide por la que pasa el ómnibus tal que, puede llegar a la parada antes de que el ómnibus pase por ella, y el tiempo de llegada a la parada del ómnibus más el tiempo de viaje hasta el centroide destino, es el menor comparándolo contra los otros ómnibus del sistema.
3. El pasajero considera un tiempo prudente para la llegada a la parada antes que el ómnibus, y planifica su salida.
4. El pasajero sale de su casa y llega a la parada.
5. Al llegar a la parada un ómnibus, si pertenece a la línea que esperaba se sube, en el caso contrario lo deja pasar.
6. El ómnibus llega a la parada destino, el pasajero baja y camina al centroide destino.

#### 4.2.5. Acceso a la información solamente en parada (Modelo 5)

La estrategia representa al escenario en el cual el pasajero elige en su origen la parada sin información en tiempo real. Esta decisión la toma comparando el peor caso para cada línea, o sea, el caso de que el pasajero llegue a la parada y que el ómnibus “recién haya pasado”, teniendo que esperar todo el periodo de la línea (inverso de la frecuencia de salida de la línea) hasta que pase un nuevo ómnibus de la misma línea.

Una vez en parada, el pasajero tiene acceso a la información en tiempo real sobre las líneas que pasan por la parada, permitiéndole recalcular su viaje.

Si bien en Uruguay no se cuenta actualmente con sistemas de información en tiempo real en parada, en otros países si existen, principalmente en sistemas de metro con pantallas que muestran los próximos arribos.

##### Especificación

1. El pasajero se encuentra en el centroide origen.
2. Busca la parada por la que pasa el ómnibus tal que, el tiempo de caminata a la parada del ómnibus más el peor tiempo de espera (periodo) y el tiempo de viaje hasta la parada destino, es el menor comparándolo contra los otros ómnibus del sistema.
3. El pasajero llega a la parada.
4. Al llegar a la parada un ómnibus que le sirve, el pasajero consulta si en ese momento no existe otro ómnibus que pasa por dicha parada y su tiempo de arribo más el tiempo de

viaje a una parada del centroide destino, es menor que el tiempo de viaje que el ómnibus en parada. Si existe, decide no tomar el ómnibus en parada y espera al candidato; de no existir toma el ómnibus de la parada. De haber varios ómnibus en parada y no existir otro candidato con menor tiempo, sube al que lo lleve en menos tiempo.

5. El ómnibus llega a la parada destino, el pasajero baja y camina al centroide destino.

#### 4.2.6. Sin información ponderando por frecuencia (Modelo 6)

En esta estrategia el pasajero carece tanto de acceso a la información en tiempo real como de acceso a la tabla de horarios estática del sistema de transporte. Por lo tanto el pasajero planificará comparando entre el peor caso para cada línea, según su experiencia. Al igual que en el modelo 5 el peor caso es aquel en el cual el pasajero llega y el ómnibus de la línea que le sirve acaba de pasar, por lo que deberá esperar el período hasta que pase un nuevo ómnibus de la misma línea.

##### Especificación

1. El pasajero se encuentra en el centroide origen.
2. Busca la parada por la que pasa el ómnibus tal que, el tiempo de caminata a la parada del ómnibus más el peor tiempo de espera y el tiempo de viaje hasta la parada destino, es el menor comparándolo contra los otros ómnibus del sistema.
3. El pasajero llega a la parada.
4. Al llegar a la parada un ómnibus que le sirve para llegar a una parada del centroide destino, el pasajero se sube sin importar si se corresponde con la línea elegida en su casa.
5. El ómnibus llega a la parada destino, el pasajero baja y camina al centroide destino.

	Pre-trip	On-trip	Tabla de horarios
Modelo 1	Si	Si	Dinámica
Modelo 2	Si	No	Dinámica
Modelo 3	Si, limitada	Si, limitada	Dinámica
Modelo 4	Si	No	Estática
Modelo 5	No	Si	Dinámica
Modelo 6	No	No	No

Tabla 4.1 - Comparativa de modelos

#### 4.2.7. Comparativa entre modelos

En la tabla 4.1 se presenta una comparación entre los distintos modelos según el momento de acceso a la información y el tipo de información consultada.

Una vez que el pasajero aparece en el centroide origen, instantáneamente planifica su viaje y sale caminando a la parada de origen, salvo que agende la salida (por contar con información pre-trip) para no esperar de más en la parada. El tiempo (muerto) que espera en el centroide origen no se contabiliza en el tiempo de viaje, se asume que mientras, el pasajero hace algo útil.

### 4.3. Diseño

El diseño del software se especifica mediante diagrama de clases y de comunicación de UML [35]. Partiendo de la base del diseño de PublicTransport 2.0 [16], se rediseñó el mismo de forma de considerar en el modelo, todos los posibles escenarios de consulta a la información relativa al estado del sistema de transporte, ya sea información en tiempo real como la tabla de horarios estática cargada en un comienzo.

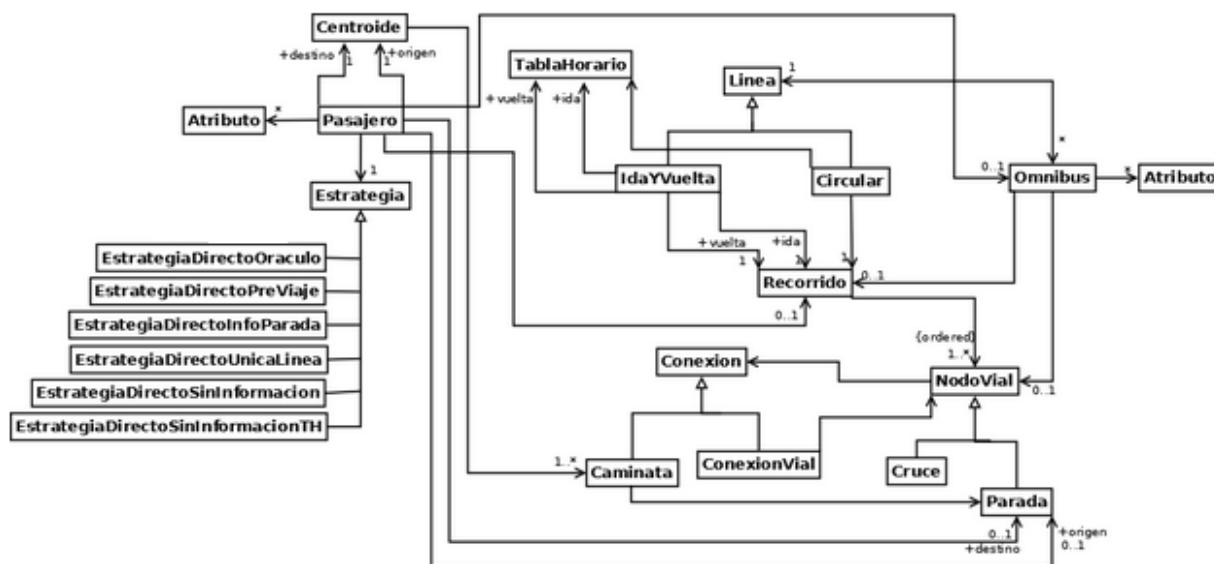


Figura 4.1 - Diagrama de clases

#### 4.3.1. Diagrama de clases

La Figura 4.1 muestra el diagrama de clases (originalmente propuesto en [16], modificado en este proyecto) con la estructura estática de los distintos elementos del sistema de transporte público.

Se puede ver que el pasajero, mantiene un centroide origen y uno de destino, que intentará conectar a través de dos nodos del tipo parada. Para lograr esta conexión, el pasajero utilizará

las distintas líneas del sistema, con sus respectivos ómnibus y recorridos.

El pasajero tendrá una estrategia definida desde el comienzo, que marcará las decisiones que tomará eligiendo su línea candidata en su centro de origen, como la posibilidad de reelegir cuando llegue a parada.

La estrategia que cada pasajero opta, se modela con el patrón de diseño Strategy [9]. En dicho patrón se designan ciertos métodos de la entidad base (IStrategy), a forma de diferenciar su resolución (StrategyX) según la invocación de un StrategyClient. En el caso particular del simulador, la elección de este patrón nos permite tomar Estrategia como clase base, y modelar los diferentes casos seleccionados en la realidad de los pasajeros (StrategyClient's) como implementaciones de la misma.

La interfaz de Estrategia proveerá entonces de dos métodos abstractos, los cuales diferencian la resolución del problema según las posibilidades de acceso a información (y ponderación de la misma) por parte del pasajero.

Al momento del pre-trip, la estrategia provee del método `elegirParadaDesdeOrigen` para la decisión inicial de cómo encaminar el viaje. Luego, cuando el pasajero ya haya comenzado el viaje, el pasajero tendrá la posibilidad de reevaluar su decisión de origen en la parada, para esto la estrategia proveerá del método `elegirOmnibus`.

El modelado de accesos a la información en tiempo real se representa según las clases que modelan la interfaz `Estrategia`:

- `EstrategiaDirectoOraculo`: Representa el Modelo 1, "Acceso constante a la información sobre todas las líneas".
- `EstrategiaDirectoPreViaje`: Representa el Modelo 2, "Acceso a la información solo en origen"
- `EstrategiaDirectoUnicaLinea`: Representa el Modelo 3, "Acceso a la información para una única línea"
- `EstrategiaDirectoSinInformacion`: Representa el Modelo 4, "Sin información usando tabla de horarios estática"
- `EstrategiaDirectoInfoParada`: Representa el Modelo 5, "Acceso a la información solamente en parada"
- `EstrategiaDirectoSinInformacionTH`: Representa el Modelo 6, "Sin información ponderando por frecuencia"

Por otra parte, al incluir estrategias de acceso a información sobre el sistema de transporte, hay que agregar al modelo un mecanismo mediante el cual el pasajero pueda ver o calcular esta información. Para esto se agrega una clase que modela la tabla de horarios, sobre la cual los pasajeros podrán tener acceso. Esta clase, denominada `TablaHorario`, mantendrá dos estructuras para consultas. La primera con la planificación inicial de las salidas de las distintas líneas (tabla de horarios estática), y la segunda con el estado del sistema actualizado según el avance del mismo.



En el nuevo modelado del sistema, no se incluyó referencias a reglas operativas, relativas al comportamiento de los ómnibus. Tampoco se trabajó con estrategias que incluyeran transbordo; esta característica es más compleja de modelar y se dejó planteada como trabajo futuro dado que excede el alcance del presente trabajo.

A continuación, se describen las principales clases del modelo.

**NodoVial:** La clase modela un nodo vial. Es una clase abstracta.

**Cruce:** La clase modela un cruce (intersección de calles). Es una implementación de **NodoVial**.

**Parada:** La clase modela una parada de ómnibus. Es una implementación de **NodoVial**.

**ConexionVial:** La clase modela una conexión vial entre dos nodos. Tiene asociado como costo, el tiempo promedio en que un ómnibus demora en recorrer la conexión.

**Línea:** La clase modela una línea de ómnibus. Las líneas de ómnibus pueden diferenciarse según su recorrido, según sea en un sentido de ida y otro de vuelta, o bien circular.

**IdaYVuelta:** La clase modela una línea con recorrido de ida y vuelta.

**Circular:** La clase modela una línea circular.

**Ómnibus:** La clase modela un ómnibus

**Recorrido:** La clase modela un recorrido, representado por una lista de nodos viales ordenados.

**TablaHorario:** Esta clase mantiene una estructura con la planificación inicial de las salidas. Esta estructura tiene formato de matriz (Tabla 4.2), donde las filas representan las distintas salidas de la línea, y las columnas tienen las diferentes paradas del recorrido. En la intersección entre fila *i*, columna *j*, se guardará el instante de tiempo del simulador (estimado) en el cual la salida *i* de la línea, visitará la parada *j*.

La construcción de la matriz (Cuadro 4.1) se realizará a partir de la frecuencia de la línea y su recorrido. La primer salida pasará por la primer parada en el tiempo 0 de la simulación. Luego se calculará el tiempo en el que pasará por la siguiente parada según los costos asociados a los nodos viales que separa las mismas (recorrido), y se marcará en la tabla de horarios. Se continuará la construcción análogamente para la primer salida.

Los tiempos de la segunda salida serán los de la primera más el período que demora en salir el siguiente ómnibus y así sucesivamente para todas las salidas. La cantidad de salidas es igual a la división entera entre el tiempo de simulación y el período.

En el caso que la línea sea de Ida y Vuelta, es necesario además calcular la tabla de horarios para el recorrido de vuelta. Para esto, el tiempo de la primer parada del recorrido de vuelta, es igual al tiempo total del recorrido de ida más el tiempo de espera en terminal (atributo de la línea).

	Parada 1	Parada 2	...	Parada j	Parada j+1	
<b>Salida 1</b>	$T_{1PARADA1}$	$T_{1PARADA2}$		$T_{1PARADAj}$	$T_{1PARADAj+1}$	
<b>Salida 2</b>	$T_{2PARADA1}$	$T_{2PARADA2}$		$T_{2PARADAj}$	$T_{2PARADAj+1}$	
...						
<b>Salida i</b>	$T_{iPARADA1}$	$T_{iPARADA2}$		$T_{iPARADAj}$	$T_{iPARADAj+1}$	
<b>Salida i+1</b>	$T_{i+1PARADA1}$	$T_{i+1PARADA2}$		$T_{i+1PARADAj}$	$T_{i+1PARADAj+1}$	

Tabla 4.2 - Matriz de Tabla de Horarios

A futuro, los datos de la tabla de horarios se podrían pre-cargar independientemente de las frecuencias. Esto permitiría modelar variaciones en la cantidad de salidas de los ómnibus, en vistas de demanda de pasajeros con aglomeraciones en horarios de alta afluencia, etc. Para esto se necesita que las tablas de horarios sean dadas como dato de entrada.

La otra estructura a mantener en esta clase es la referente al estado en tiempo real del sistema de transporte. Esta estructura parte como una copia de la estructura planificada, pero se va actualizando según atrasos o adelantos de los ómnibus. Estos retrasos son modelados con una distribución de probabilidad normal, que se define en la sección 4.4.2. Si un determinado ómnibus llega con cierto retraso a la parada i del recorrido, esto generará que esta estructura atrase el tiempo estimado de llegada de dicho ómnibus a las siguientes paradas. Los pasajeros que tengan acceso a consultar esta estructura de datos, podrán enterarse de este atraso del ómnibus y volver a planificar su viaje según corresponda, desestimando el ómnibus si tienen opciones más atractivas.

```

T1PARADA1 = 0
T1PARADAj+1 = T1PARADAj + tiempo_recorrido(Parada j, Parada j+1, linea.recorrido)
Ti+1PARADAj+1 = TiPARADAj+1 + linea.frecuencia

donde

def tiempo_recorrido(parada, parada_siguiente, recorrido)
    t = 0
    NodoVial iterador = recorrido.nodosviales->begin()

```

```

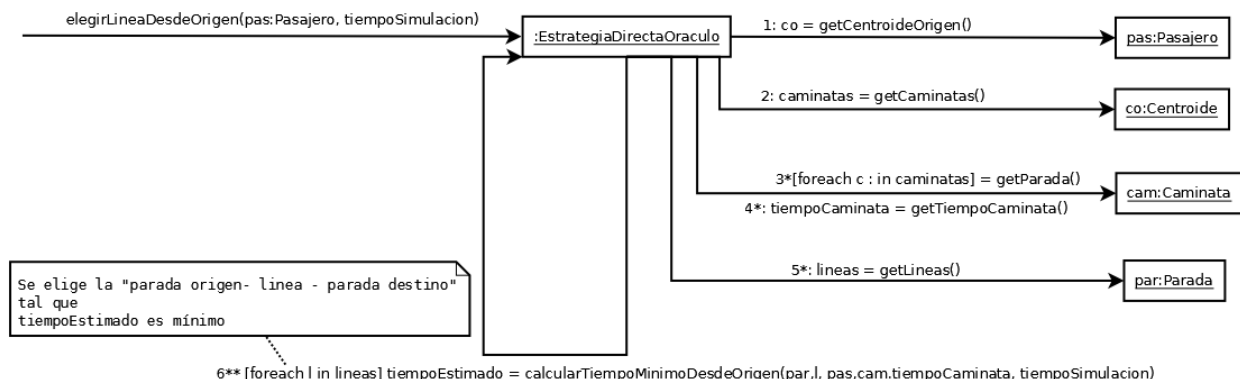
while (iterador != parada)
    iterador++;
end while
while (iterador != parada_siguiente)
    t += costo [iterador, iterador + 1];
    iterador++;
end while
return t
end def

```

**Cuadro 4.1 - Pseudocódigo de construcción de Matriz de Tabla de Horarios**

**Estrategia:** Entidad base. Provee dos operaciones abstractas, las cuales diferencian la resolución del problema según las posibilidades de acceso a información (y ponderación de la misma) por parte del pasajero. Las operaciones mencionadas son `elegirParadaDesdeOrigen` y `elegirOmnibus`. La implementación de las mismas se detallará en la especificación de cada estrategia en particular.

**EstrategiaDirectaOraculo:** La clase modela la estrategia de “Acceso constante a la información sobre todas las líneas”, extendiendo las funciones de Estrategia de modo que tanto las elecciones desde origen o en parada accedan a la tabla de horarios dinámica. La elección de la parada desde origen se modela según el diagrama de la figura 4.2, donde se puede ver el acceso a la tabla de horarios dinámica a través de las funciones propias de la línea `obtenerProximoArribo` y `obtenerTiempoArribo`.



**Figura 4.2 - Diagrama de comunicación de elegirLineaDesdeOrigen**

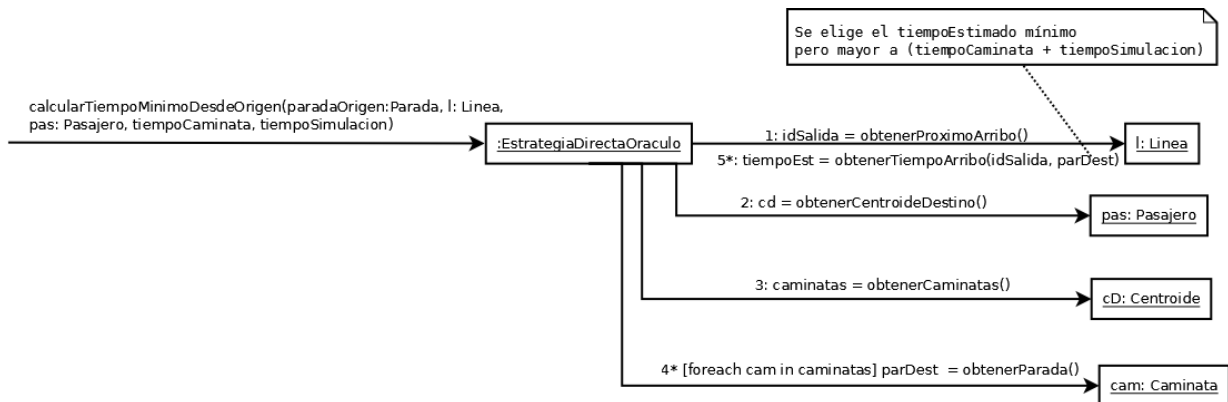


Figura 4.3 - Diagrama de comunicación de calcularTiempoMinimoDesdeOrigen

En origen el pasajero evalúa todas las posibles paradas de su centroide, y calcula cuál de las líneas que pasan por estas lo llevará en menor tiempo al centroide destino, tomando en consideración la tabla de horarios en tiempo real. Ya en la parada origen el pasajero a medida que van llegando ómnibus consulta la información en tiempo real, a través de la implementación de `elegirOmnibus` mostrada en la figura 4.4.

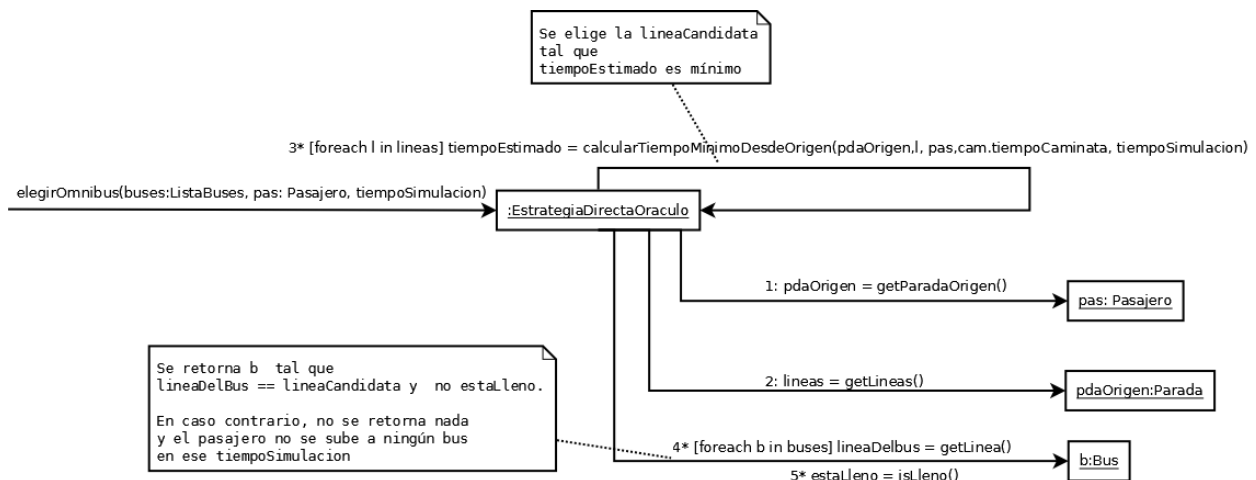


Figura 4.4 - Diagrama de comunicación de elegirOmnibus

**EstrategiaDirectoPreViaje:** La clase modela la estrategia de “Acceso a la información solo en origen”.

La implementación de esta estrategia resuelve `elegirLineaDesdeOrigen` de la misma forma que `EstrategiaDirectaOraculo`, ya que hay acceso a la información en tiempo real en el pre-trip. La implementación de `elegirOmnibus` una vez en la parada resulta mucho más simple que `EstrategiaDirectaOraculo`, ya que del listado de ómnibus que arriben a la parada el pasajero solo seleccionará aquel que pertenezca a la línea elegida en origen (Figura 4.5).

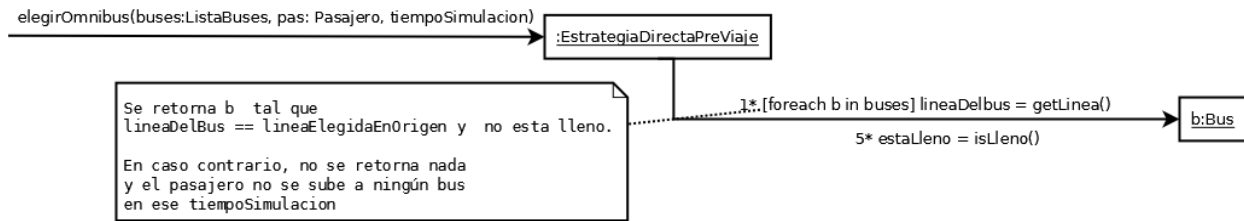


Figura 4.5 - Diagrama de comunicación de elegirOmnibus

**EstrategiaDirectoInfoParada:** La clase modela la estrategia de “Acceso a la información solamente en parada”. La elección desde origen, a partir de `elegirLineaDesdeOrigen`, no considerará la tabla de horarios en tiempo real. La línea elegida desde origen se pondera según el mejor “peor caso”, es decir, el mínimo tiempo considerando la suma de tiempos estáticos de caminatas, el período (inverso de la frecuencia), y tiempos estimados por cada línea entre dos paradas de una línea a partir de la tabla estática (Figura 4.6).

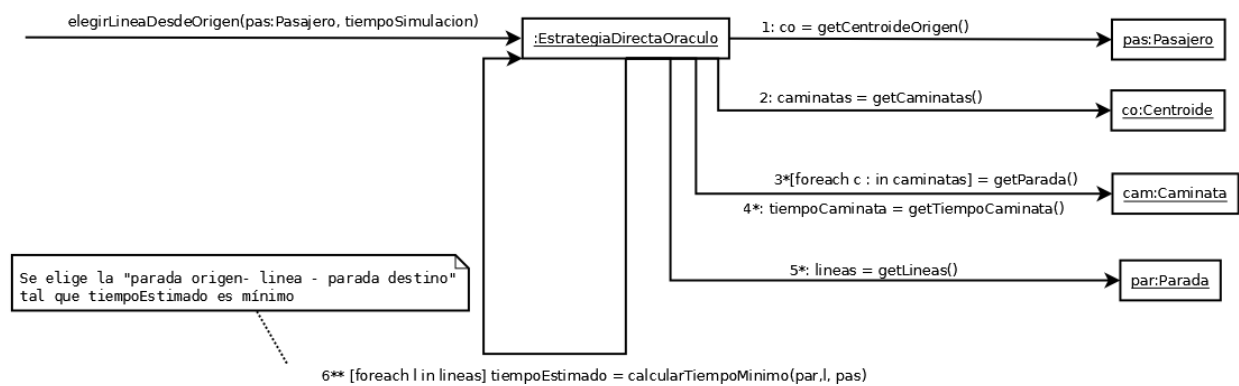


Figura 4.6 - Diagrama de comunicación de elegirLineaDesdeOrigen

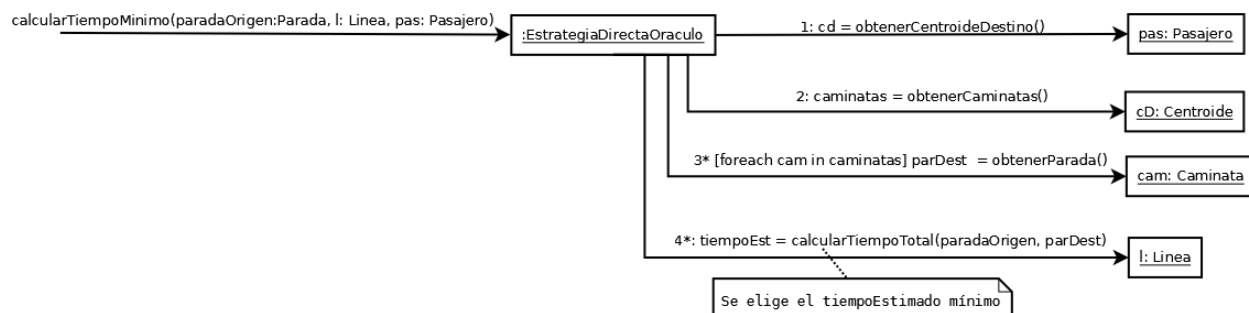


Figura 4.7 - Diagrama de comunicación de calcularTiempoMinimo

La invocación a `elegirOmnibus` se resolverá de la misma forma que en la `EstrategiaDirectaOraculo`, considerando los valores de la tabla de horarios dinámica.

**EstrategiaDirectoUnicaLinea:** La clase modela la estrategia de “Acceso a la información para una única línea”. La implementación de `elegirLineaDesdeOrigen` en esta estrategia es una versión acotada de forma similar a `EstrategiaDirectaOraculo`, pero a la hora de realizar el llamado a la tabla de horario, no será sobre los datos de la información en tiempo real, sino sobre la planificación estática. La resolución de `elegirOmnibus` resulta similar también a `EstrategiaDirectaOraculo`, pero la tabla de horarios dinámica se considera únicamente para la línea elegida en el origen.

**EstrategiaDirectoSinInformacion:** La clase modela la estrategia de “Sin información ponderando por frecuencia”. La implementación de `elegirLineaDesdeOrigen` es igual a la implementación en `EstrategiaDirectaInfoEnParada`. La implementación de `elegirOmnibus` se simplifica de forma tal que el pasajero toma el primer ómnibus que arrije a la parada y lo lleve al centroide destino (Figura 4.8).

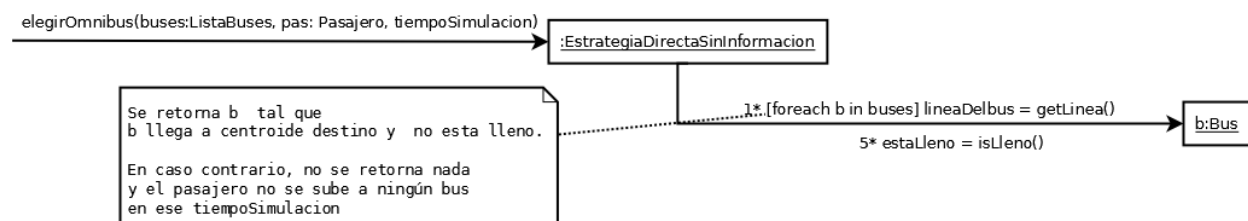


Figura 4.8 - Diagrama de comunicación de elegirOmnibus

**EstrategiaDirectoSinInformacionTH:** La clase modela la estrategia de “Sin información usando tabla de horarios estática”. La implementación de esta estrategia resuelve `elegirLineaDesdeOrigen` de forma similar a `EstrategiaDirectaOraculo`, pero a la hora de realizar el llamado a la tabla de horarios, no será sobre los datos de la información en tiempo real, sino sobre la planificación estática. La resolución de `elegirOmnibus` es similar a la resolución en `EstrategiaPreViaje`.

#### 4.4. Modelo de simulación

El modelo de simulación, en particular lo referente al aspecto dinámico del sistema, se especifica mediante diagrama de actividades.

Para construir dichos diagramas, a diferencia del proyecto de grado [16], se consideró la inclusión de un evento que marque la importancia de la planificación pre-trip de un viaje cuando se tiene acceso a la información brindada por la tabla de horarios de las distintas líneas del sistema. El pasajero consulta el horario de pasada de su línea candidata, y debe ser capaz de agendar la salida de su casa de forma que minimice en lo posible, el tiempo de espera en la parada origen. Esta consideración además de modelar la realidad de un pasajero estándar, optimiza el viaje del mismo, ya que el tiempo total de viaje disminuye. A los efectos del simulador la inclusión de este evento influye directamente en las respuestas de interés, efecto que se estudiará en la sección 5.1.

Además de la consideración ya enunciada, en el modelado actual no se consideró las opciones sobre viajes con transbordo. Esto se debe a que considerar los mismos incluía una complejidad mayor en el simulador, llevando el proyecto a considerar escenarios que complican el estudio de la influencia de los sistemas en tiempo real en sí.

El diagrama de la figura 4.8, tomado de [16] y adaptado al proyecto, describe el ciclo de vida de los ómnibus y pasajeros en el sistema, además de las interacciones con otras entidades. Estas interacciones se realizan a través de eventos del simulador, representados con Bn si son fijos, o Cn si son condicionados.

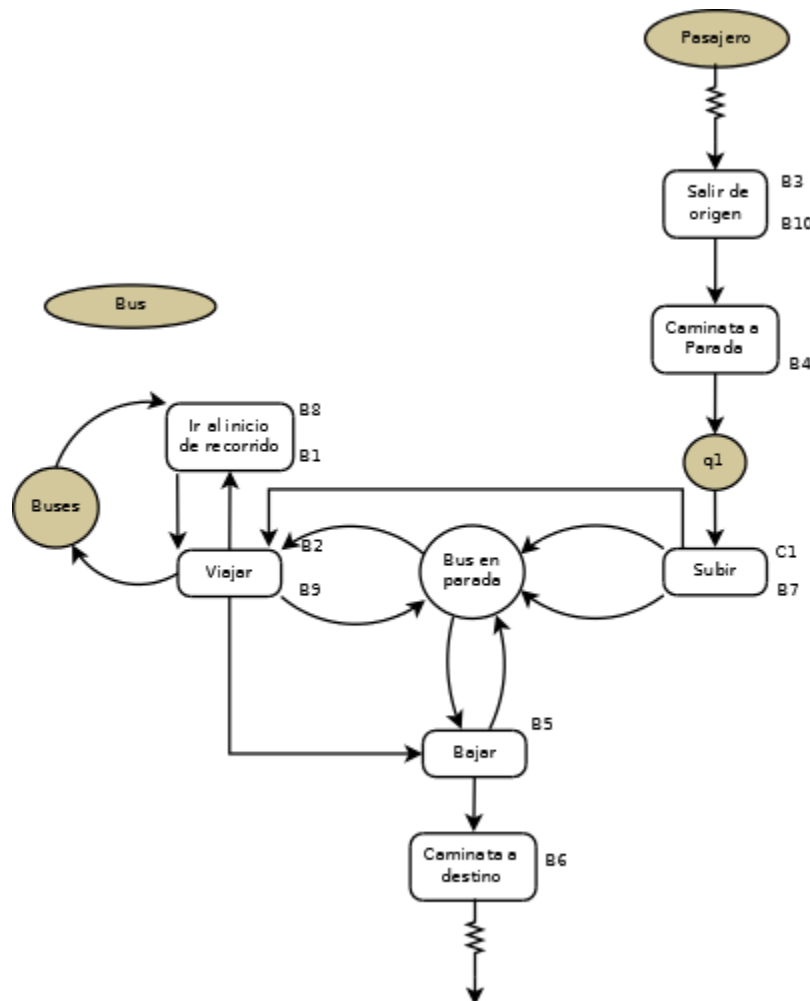


Figura 4.8 - Diagrama de estados del sistema

Los eventos utilizados para modelar el sistema están indicados en el diagrama de actividades y son descritos en la tabla 4.3.

	Tipo	Acción
{C1*}Subida Pasajero Bus	Condicionado	Gestionar para todas las paradas, la subida de los pasajeros a los ómnibus.
{B1}Comienzo Recorrido Bus	Fijo	Encargado de la lógica de salida del ómnibus por los nodos viales de su recorrido.
{B2}Arribo Bus a Nodo	Fijo	Marca la llegada de un ómnibus a un nodo. Si este es del tipo parada, marca la posible bajada de pasajeros y actualiza la tabla de horarios dinámica.
{B3*}Comienzo Viaje Pasajero	Fijo	Encapsula el comienzo de viaje del pasajero.
{B4*} Arribo Pasajero a Parada	Fijo	Encola el pasajero en parada.
{B5} Baja Pasajero Bus	Fijo	Procesa el momento en que el pasajero baja en una parada.
{B6} Arribo Pasajero Centroide	Fijo	Procesa el momento en que el pasajero llega a su centroide final.
{B7} Fin Subida Pasajeros	Fijo	Indica que el pasajero ya subió al ómnibus.
{B8} Frecuencia Bus	Fijo	Controla que los ómnibus viajen por el sistema de acuerdo a su frecuencia establecida.
{B9} Cambio línea vuelta	Fijo	Este evento es el encargado de establecer el recorrido de vuelta de un ómnibus
{B10} Salida Casa Pasajero	Fijo	Indica la espera del pasajero en el centroide origen, de forma de no salir con tanta antelación a la parada.
* Los pasajeros con capacidad de consulta sobre la tabla de horarios actualizada del sistema, podrán realizar consultas en este momento.		

**Tabla 4.3 - Descripción de los eventos**

### **ComienzoRecorridoBus**

Este evento marca la salida de un ómnibus desde su origen. Dicha salida inicializa al ómnibus y agenda la llegada al primer nodo de su recorrido.

### **ArriboBusNodo**

Dicho evento marca la llegada de un ómnibus a un nodo vial del recorrido, el cual puede ser una parada o bien un cruce.

El tiempo de viaje de los ómnibus entre dos nodos viales no es el mismo para todos los casos. Si bien existe un tiempo de viaje fijo que es un dato de entrada, en la realidad existen distintos tipos de demora que pueden hacer que el tiempo varíe de dicho valor fijo. Aquellas actividades donde la variación es aleatoria alrededor de un valor medio, son usualmente aproximadas por la distribución Normal. Esto implica entonces que los tiempos insumidos por los ómnibus son el resultado de una distribución Normal cuya media es igual al tiempo entre nodos viales (dato de



entrada) y su desviación estándar se mantiene en  $1/5$  de la media. Si hay valores negativos entonces el resultado es cero [16].

Si el nodo vial es una parada, se bajarán del ómnibus los pasajeros que tienen dicha parada como destino. Esta bajada se marcará con el agendado del evento **BajaBusPasajero**.

Si el nodo vial es un cruce, y es el último nodo del viaje, el ómnibus finalizará su recorrido en caso de ser una línea circular; o bien, agendará el cambio de sentido opuesto en el caso de ser una línea de ida y vuelta.

### **ComienzoViajePasajero**

A partir de este evento, un pasajero generado comienza su viaje. La generación de pasajeros (tiempo entre entidades que surgen en un origen para ir a un destino) se modela con una distribución exponencial negativa con media igual a la demanda entre centroide origen y destino proporcionada en los datos de entrada del simulador [16].

Al generarse, el pasajero elegirá cómo comenzar su viaje desde el centroide origen. Tomará esta decisión a partir de la información del centroide destino al que quiere llegar, y de su estrategia. En caso de tener una estrategia con acceso a información pre-trip, el pasajero podrá consultar las tablas de horario dinámicas o estáticas del sistema, realizando así una decisión (a priori) optimizada de su viaje, planificando la salida del centroide con un tiempo prudente. En caso de que no pueda acceder a información pre-trip el pasajero planificará su viaje según su conocimiento sobre las frecuencias de los ómnibus, ponderando entre los “peores casos” (inverso de frecuencia de la línea más tiempo de viaje) de las opciones posibles, el que lo lleve en menor tiempo.

En caso de planificar su salida por información pre-trip, el pasajero agendará la salida de su casa (centroide origen) de acuerdo a llegar a la parada con un tiempo prudente (unos cinco minutos). En caso de no planificar, saldrá de su casa inmediatamente, agendando el arribo a la parada origen según el tiempo de la caminata hacia la misma.

Además, en este evento se agendará la creación de otro pasajero en el mismo centroide origen, con el mismo centroide destino, calculando el tiempo según la matriz de demanda del sistema.

### **SalidaCasaPasajero**

Evento solo accesible por pasajeros que tienen acceso a la información del sistema de transporte en pre-trip.

El pasajero saldrá de su casa hacia a una parada origen, ya elegida previamente. El arribo a esta parada se agendará según el tiempo de la caminata asociado a la misma.

### **ArriboPasajeroParada**

Este evento marca la llegada de un pasajero a la parada, donde esperará el arribo de un ómnibus que lo lleve a su centroide destino.

Este evento no agendará ningún otro evento, pues el pasajero abordará un ómnibus según el evento condicional SubidaPasajeroBus.

### **SubidaPasajeroBus**

Como indicaba el evento anterior, este evento es el encargado de marcar posibles abordajes de los pasajeros en una parada, a los ómnibus que arriben a la misma.

Al arribar un ómnibus a una parada, todos los pasajeros en la misma evaluarán subirse. Esta decisión será calculada según el acceso a información que dispongan, de acuerdo a su estrategia, y su decisión inicial.

Las estrategias que mantengan acceso en tiempo real a la información del sistema de transporte, permitirán al pasajero evaluar cuál es el ómnibus, en parada o próximo a arribar, qué lo lleva al centroide destino en menos tiempo.

Las estrategias que no permitan acceso a información en tiempo real desde la parada, harán que el pasajero evalúe según su conocimiento en frecuencias, el tiempo que estima le llevará el ómnibus en parada en comparación con su decisión inicial.

En caso de que ninguno de los ómnibus en parada le sirva para llegar a destino, o le sea más atractivo otro que está próximo a arribar, el pasajero permanecerá en parada esperando un nuevo arribo.

En caso de elegir como candidato uno de los ómnibus en parada, el pasajero agendará su subida (FinSubidaPasajero), la cual dependerá del largo de la cola formada para subir y el tiempo de subida de un pasajero definido por una constante.

### **FinSubidaPasajero**

Indica la finalización de la subida de un pasajero a un ómnibus. El pasajero se quitará de la parada en donde se encontraba, y en caso de completar la capacidad del ómnibus, el mismo se marcará como lleno, imposibilitando a futuros pasajeros a subir al mismo a menos que se liberen lugares.

### **BajaPasajeroBus**

Este evento indicará el descenso de un pasajero de un ómnibus. El pasajero se quitará del ómnibus en el cual se encontraba, y agendará su llegada al centroide destino.

En versiones anteriores del simulador, este evento era de particular importancia para pasajeros con estrategias con transbordo. En esta versión del simulador, estas estrategias fueron descartadas.

### **ArriboPasajeroCentroide**

Con este evento el pasajero finaliza su ciclo de vida en el simulador. El pasajero arriba al centroide destino, y actualiza los datos relativos a sus tiempos de viaje.

### **FrecuenciaBus**

Este evento realiza las salidas de las líneas, con su frecuencia predeterminada.

Al ejecutarse, se buscará un ómnibus ya activo en el sistema, que esté esperando para salir a cumplir un recorrido. En caso de no existir, se agrega uno nuevo. Se agendará el evento de ComienzoRecorridoBus inmediatamente después.

Para continuar con las frecuencias, este evento se agendará a sí mismo cierto tiempo después, según la frecuencia de la línea. Se asume que la flota de ómnibus es infinita, para no imponer limitaciones al sistema en este sentido.

### **CambioLineaVuelta**

En un ómnibus asignado a una línea de ida y vuelta, este evento marcará el comienzo del recorrido de vuelta.

## **4.5. Consideraciones de implementación**

A partir de la necesidad de mantener una tabla de horarios con la información actualizada de los ómnibus, se presentó la oportunidad de mejora para re-implementar las funciones de cálculo de tiempos de recorrido entre paradas.

En los proyectos de grado anteriores se calculaba el tiempo de recorrido sumando todos los pesos de las aristas entre nodos viales de forma iterativa, a partir de la nueva versión se mantiene la hora de llegada a cualquier parada en una tabla. Esto mejora el tiempo de ejecución de cada experimento en forma considerable, de forma que permite la ejecución de varios experimentos en menos tiempo que las versiones anteriores.

La manipulación de la tabla de horarios, también facilitará a futuro el empleo de tablas a medida que por ejemplo sus salidas no se desprendan de la frecuencia de la línea o los tiempos entre parada del costo de las aristas del recorrido en el grafo de entrada.

Contar con el evento SalidaCasaPasajero permite modelar más fielmente el comportamiento de un pasajero que tiene información de a qué hora pasa el ómnibus deseado por la parada. Comportamiento que no podía ser modelado bajo el esquema utilizado en versiones anteriores del simulador.

La implementación del simulador se realizó sobre el lenguaje de programación C++, con la utilización de la biblioteca de simulación de eventos discretos EOSimulator [11], al igual que en los Proyecto de Grado anteriores [28] [16].

Las simulaciones son ejecutadas en la plataforma Microsoft Windows 8, en un equipo con procesador i7 3639QM con 8 GB de memoria RAM. Cada ejecución se compone de 100 experimentos independientes en los que se simula 6 horas en el sistema de transporte. El tiempo promedio de cada ejecución es de aproximadamente 30 minutos, dependiendo del modelo ejecutado.

## 5. Experimentación

En este capítulo se detalla cómo se realizó la verificación y experimentación del simulador. Todas las pruebas fueron realizadas con un mismo juego de datos de entrada, y para cada una de ellas se ejecutaron todos los modelos del simulador.

A partir de los proyectos antecesores a este en temas relacionados, contamos con los datos sobre el sistema de transporte público de la ciudad de Rivera, Uruguay; el Apéndice C incluye una descripción general de dicho caso de estudio. Sobre éstos datos se ejecutaron tres experimentos.

En el primero se emplearon los datos de Rivera, tal como fueron relevados: frecuencia de las líneas, demanda y distribución de arribo de los ómnibus a las paradas. Para el segundo experimento se cambió el período de tiempo entre salidas de una misma línea a una cuarta parte del tiempo estipulado en el primer experimento y en el tercero se cambió la distribución de arribos de los ómnibus a una de diferente naturaleza.

Los objetivos de estos experimentos son: (1) validar y evaluar los modelos propuestos, en términos de los efectos de los diferentes comportamientos sobre el tiempo de viaje en el escenario de estudio, (2) analizar los efectos en un escenario con mayores frecuencias (en cierto sentido, más dinámico) y (3), en uno con mayor variabilidad.

Dado que el modelo de simulación es estocástico, esta característica se modela utilizando varias distribuciones de probabilidad, las que están controladas por una semilla, cambiando la misma, se obtienen replicaciones independientes.

### 5.1. Verificación

A medida que se avanzó en la creación de los modelos fue necesario determinar cómo se realizaría la verificación y validación.

Se optó por registrar la información asociada a las distintas entidades y los momentos en los que interactúan con los eventos del sistema. A partir de dichos datos se estudia el correcto desarrollo de la simulación. También es ésta la información que se emplea en el análisis de los experimentos que serán realizados. Sirviendo por ende a un doble propósito.

En el simulador ya existían varios archivos de salida de datos:

- “Incidencias\_xx.txt”: en este archivo se registran aquellos pasajeros para los que no se puede encontrar un viaje que satisfaga el requerimiento de Origen-Destino que tienen y los tiempos de espera excesivos en parada.
- “Validacion\_xx.txt”: contiene un resumen del viaje de cada pasajero, marcando los datos de la línea elegida por el mismo, así como los tiempos de viaje a parada y sobre el ómnibus.

- “ReporteFinal\_xx.txt”: registra datos de la simulación de utilidad para proyectos anteriores, como ser z1, z2 (métricas específicas de validación), cantidad de pasajeros generados y transportados, ómnibus del sistema y estados de los mismos al finalizar la simulación.
- “EsperaPasajeros\_xx.txt”: histograma de los tiempos de espera de los pasajeros generados, en parada.

Se determinó que estos datos no eran suficientes para analizar correctamente el sistema. Por ejemplo, no se contaba con información de las evaluaciones realizadas por los pasajeros y todos los instantes en los que los eventos los afectaban. Se modificaron algunas salidas existentes agregando más datos y creamos nuevas salidas:

- “TablasHorarios\_xx.txt”: en este archivo se imprime para cada línea de ómnibus del sistema, la tabla de horario asociada a la misma, con la información estática y dinámica de los tiempos de pasaje de los ómnibus de la línea, por cada parada.
- “Bitacoras\_xx.txt”: que registra todas las decisiones y evaluaciones realizadas por los pasajeros y los distintos tiempos en los que el pasajero se ve afectado por los eventos de la simulación.
- “ViajePasajeros\_xx.txt”: en este nuevo histograma se registran todos los tiempos de viaje totales de los pasajeros, sumando tanto las caminatas, esperas en paradas y tiempo a bordo del ómnibus. A partir de este histograma es posible calcular el tiempo de viaje promedio de un pasajero en la simulación.

La metodología aplicada para realizar la verificación de los modelos fue la siguiente:

1. Ejecutar el simulador empleando el modelo a verificar. Generar las salidas propias de dicha ejecución.
2. A partir de “Incidencias\_xx.txt” identificar si hay pasajeros para los cuales existe un viaje posible pero no pudieron viajar.
3. A partir de “EsperaPasajeros\_xx.txt” identificar aquellos viajes que sean muy largos o muy cortos.
4. Una vez identificados dichos pasajeros, observar el viaje que realizaron y sus evaluaciones en “Bitacoras\_xx.txt” y comparar las evaluaciones que realiza con las posibilidades de viaje en función de “TablasHorarios\_xx.txt”.
5. Determinar si esos casos surgen por un error o por la particularidad del viaje del pasajero. Si a partir del análisis de dichos datos quedan dudas se procede a debuggear el programa viendo en detalle los pasos realizados por el pasajero objetivo. Para eliminar elementos aleatorios de la ejecución se emplea la misma semilla.
6. Llegado el punto en el cual solo quedan singularidades que pueden ser explicadas y se vio que los pasajeros viajan según lo esperado, se da por válido el modelo.

La propia tarea de verificación también permite chequear el correcto desarrollo de la simulación y, contar con la información necesaria para realizar los experimentos.

En “EsperaPasajeros\_xx.txt” se despliega el histograma de tiempos de espera en parada de los pasajeros. Los tiempos son en segundos, en la columna de la izquierda figuran los tiempos de espera en parada y en la columna de la derecha la cantidad de pasajeros que tuvieron dicho tiempo de espera. El parámetro “mean” refiere al promedio de los tiempos calculados sobre la totalidad de pasajeros transportados en la simulación, en este caso tiempo de espera en parada; y “sd” a la desviación estándar calculada en este caso.

```
Tiempos de espera de pasajeros - Observation Histogram
procesed = 4319
mean = 848.642    variance = 511169    sd = 714.961
minX = 0.210161    maxX = 4578.95
minY = 1    maxY = 27
```

```
[...]
[...]
[...]
```

4528.58	0
4533.16	0
4537.74	0
4542.32	0
4546.90	0
4551.48	0
4556.05	0
4560.63	0
4565.21	0
4569.79	0
4574.37 **	1

Se detecta tiempo de espera en parada anómalo.

En “Incidencias\_xx.txt” se identifica al pasajero con dicho tiempo de espera. Inicia indicando el tiempo en segundos cuando ocurrió la incidencia, seguido por el identificador del pasajero, de donde inicia su viaje y hacia dónde se dirige, el tiempo de espera en parada y finalmente la línea que seleccionó.

```
[ 18441.25] WARN tiempo en parada exesivo {idPasajero: 2348, cOrig: 0, cDest: 30, tEspera:
4578.95, linea: 3}
```

Una vez identificado el pasajero se procede a revisar su entrada en “Bitacoras\_xx.txt”

```
*****
Pasajero ID = 2348
Centroide origen:          0
Centroide destino:        30
*****

Hora de creacion:          13577.78
Demora Salida de casa:    0.00
Hora salida de casa:      13577.78
Tiempo caminata a pOrig : 284.52
Hora arribo a pOrig :     13862.30
```

```

Hora llegada bus pOrigen:      18441.25
Tiempo de espara en para:      4578.95
Hora subida bus:                18441.25
idBus utilizado:               3
idLinea utilizada:             3
idSalida utilizada:            17

hora bajada del bus:           25636.78
hora llegada a c.destino:       26141.56
tiempo total de viaje:         12563.78

Tiempo loco :                  0
Linea elegida ini:             3
Tiempo estimado de viaje :     19975.6
Opciones posibles :
>> {1: 3, s: -1, o: 361, d: 341, hSim: 13577.78, tCam: 284.52, hPar: 13862.30, hArribBus:
    -1.00, hDest: 19975.58}
>> {1: 3, s: -1, o: 362, d: 341, hSim: 13577.78, tCam: 754.50, hPar: 14332.28, hArribBus:
    -1.00, hDest: 20492.72}
>> {1: 3, s: -1, o: 295, d: 341, hSim: 13577.78, tCam: 1873.92, hPar: 15451.70, hArribBus:
    -1.00, hDest: 21322.82}
>> {1: 3, s: -1, o: 364, d: 341, hSim: 13577.78, tCam: 2195.52, hPar: 15773.30, hArribBus:
    -1.00, hDest: 22102.64}
>> {1: 3, s: -1, o: 293, d: 341, hSim: 13577.78, tCam: 2751.36, hPar: 16329.14, hArribBus:
    -1.00, hDest: 22106.12}
Linea elegida parada:          3
Parada bajada del bus :        337
Tiempo de caminata a c.destino : 504.78
Cant buses dejo pasar en parada : 0
Tiempo estimado de viaje :     15160.50
Opciones posibles :
>> {1: 3, s: -1, o: 361, d: 341, hSim: 18441.25, tCam: 0.00, hPar: 18441.25, hArribBus:
    -1.00, hDest: 24554.53}
*****

```

Se verifica que para la pareja O-D, el viaje que elige es el mejor y se ven los valores en "TablaHorario\_xx.txt"

[...]	361	[...]	341
... 3279.84, 3037.77		... 5495.16, 5089.03	
.... 6879.84, 7423.12		... 9095.16, 9909.74	
.... 10479.84, 10373.16		... 12695.16, 12248.19	
.... 14079.84, 13336.77		... 16295.16, 14983.07	
.... ----13862.30 hora arribo pasajero parada-----			
.... ----18441.25 hora subida bus-----			
.... 17679.84, 18441.25		... 19895.16, 20997.63	
.... 21279.84, 21659.96		... 23495.16, 24098.20	
.... ----25636.78 hora bajada del bus:-----			
.... 24879.84, 25721.59		... 27095.16, 28223.76	
.... 28479.84, 28550.30		... 30695.16, 30599.98	
.... 32079.84, 31926.44		... 34295.16, 33861.44	
.... 35679.84, 35331.33		... 37895.16, 37329.29	
.... 39279.84, 38731.50		... 41495.16, 40312.02	
.... 42879.84, 43159.94		... 45095.16, 45375.26	



Se detectan 2 inconsistencias en la bitácora de viaje del pasajero, por un lado, al calcular los recorridos evalúa correcto descender en la parada 341, pero lo hace en la parada 337. Tampoco coincide la hora de bajada del ómnibus con los tiempos de arribo del ómnibus a la parada 341.

Se procede a debuggear el programa para detectar y corregir el error. Luego de corregirlo, se repiten las pruebas buscando inconsistencias, en caso de encontrarlas se busca la causa y se la corrige. Este proceso se repitió hasta que las incidencias que quedaron estaban debidamente justificadas. Por ejemplo hay pasajeros que solo les sirve una línea de alta frecuencia y que llegan a la parada unos momentos luego de que ha pasado el ómnibus haciendo que tengan un tiempo de espera en parada inusual.

Una vez que teníamos los modelos debidamente verificados y validados procedimos a estudiar los modelos desde un punto de vista estadístico.

## 5.2. Experimentos

Los resultados de una corrida de la simulación son promedios de valores tomados a lo largo de toda la simulación. Estos resultados son llamados respuestas, y como son muestras de una distribución de probabilidad (ya que la simulación es “alimentada” por factores aleatorios como ser los arribos de pasajeros y ómnibus) pueden variar de una corrida a otra. Se necesitan realizar varios experimentos independientes para poder estimar la varianza de la distribución que estas respuestas generan.

Si se realizan  $n$  experimentos, se le llama  $x_i$  a la  $i$ -ésima respuesta del  $i$ -ésimo experimento. Llamamos  $\mu$  al promedio de las respuestas y lo estimamos como:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

La dispersión de la variable aleatoria respecto de su media, se mide mediante la desviación estándar o la varianza  $\sigma^2$ . Ésta se estima como:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^2}{n(n-1)}$$

Una varianza grande significa que no todos los valores que toma la variable aleatoria están cerca de la media.

Como en este caso el tipo de simulación es terminal, se necesitan correr varios experimentos o replicaciones para obtener respuestas independientes y así poder calcular la media total (promedio de las respuestas de cada uno de los experimentos) y la varianza.

Existen varios métodos de comparación para los resultados obtenidos en una simulación [29], en particular en este Proyecto de Grado se utilizó la comparación mediante intervalos de confianza.

Para saber con qué grado de seguridad se estima el valor medio de la distribución, se calcula un intervalo de confianza, que nos brinda una medida de confianza que se puede tener en la estimación. Para  $n$  replicaciones independientes, esto en cierto sentido expresa que si se corren  $n$  replicaciones más, sus medias van a caer dentro del intervalo de confianza con una cierta probabilidad  $v$  (por ejemplo 0,95) que se denomina nivel del intervalo [29].

Para muestras grandes como las que se usaron en esta simulación, los límites de un intervalo de confianza se pueden calcular con la tabla de la distribución Normal.

El intervalo de confianza al 95% se define como:

$$\mu \pm 1.96 \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^2}{n(n-1)}}$$

Para realizar los experimentos desarrollados a continuación se tomaron como entrada los datos de la ciudad de Rivera, generados por igoR-tp 3.0 [16] (grafo vial, matriz de demanda y líneas) que es una herramienta para diseñar, construir, editar y evaluar grafos del modelo de red vial relacionados al problema TNDP. Procedemos a estudiar los resultados obtenidos de ejecutar el simulador 100 veces para cada uno de los modelos.

### 5.2.1. Experimento 1 - Efectos de los modelos sobre los tiempos totales de viaje

Como primer objetivo se decidió ver la incidencia de los distintos modelos implementados en el tiempo total de viaje del pasajero. Este valor es la suma de los tiempos de caminata del origen a la primer parada, la espera en la parada, el tiempo de viaje en ómnibus, y el tiempo de caminata de la parada final al centroide destino.

Los modelos contruidos hacen foco en tres grandes factores, de los cuales se intentará evaluar su incidencia en el tiempo total. Estos factores son: el acceso a la tabla de horarios, el acceso a la información en el pre-trip, y el acceso a esta información en tiempo real.

Los promedios de viaje según el modelo se toman de los histogramas de tiempos totales, luego de 100 repeticiones del experimento. Además, para cada media total, se calculó el intervalo de confianza al 95% del mismo.

Se manejó la hipótesis de que a mayor acceso a información sobre el sistema de transporte, el pasajero realizará viajes de menor tiempo total. Por esto se espera que los modelos que emplean información en tiempo real en origen y parada sean los que reporten mejores tiempos de viaje, seguido de aquellos que usen información estática y quedando en último lugar los que no empleen información más que el recorrido de los ómnibus y sus frecuencias.

En Tabla 5.1 se muestran los resultados recabados.

Modelo	Media (segs.)	Intervalo de confianza
1 - Acceso constante a la información sobre todas las líneas	2589,03	3,03
2 - Acceso a la información solo en origen	2612,59	2,99
3 - Acceso a la información para una única línea	2625,36	3,20
4 - Sin información usando tabla de horarios estática	2693,29	3,30
5 - Acceso a la información solamente en parada	2960,34	3,35
6 - Sin información ponderando por frecuencia	3778,66	5,11

**Tabla 5.1 - Tiempos de viajes promedios con intervalos de confianza**

Se puede ver que los resultados mantienen cierta coherencia respecto a lo esperado. Los modelos 1, 2, 3, 4 reportan medias más pequeñas que los otros, habiendo una diferencia menor con el 5 y una gran brecha con el 6.

Los pequeños valores de los intervalos de confianza marcan que la media parece estabilizarse en un número grande de repeticiones del experimento. Esto se produce porque el valor considerado es un promedio obtenido al dividir la sumatoria del tiempo total de viaje entre la cantidad de pasajeros transportados, que es un valor relativamente grande.

Los datos se grafican en el Gráfico 5.1.

El primer factor a analizar es el acceso a la tabla de horarios. Al comparar cualquiera de los modelos con el Modelo 6, para el cual el pasajero no accede a la información de las tablas de horario en ningún momento del viaje, vemos que el intervalo de confianza de su media es disjunto al resto. De esto podemos concluir que estadísticamente todos los pasajeros que realizan viajes empleando los otros modelos, las cuales en mayor o menor medida acceden a la tabla de horario, obtendrán menores tiempos de viaje.

Si se compara éste modelo con el Modelo 5, el pasajero en ambos tomará su decisión inicial (pre-trip) basado en su experiencia sobre las frecuencias de las líneas. Pero el acceso a información en tiempo real en parada, le permite mejorar la elección de qué línea tomar. De esta forma no aborda el primer ómnibus que lo lleva a destino, sino el que evalúa que lo dejará en destino más rápidamente. De esta forma se mejora considerable en el tiempo de viaje en el Modelo 5.

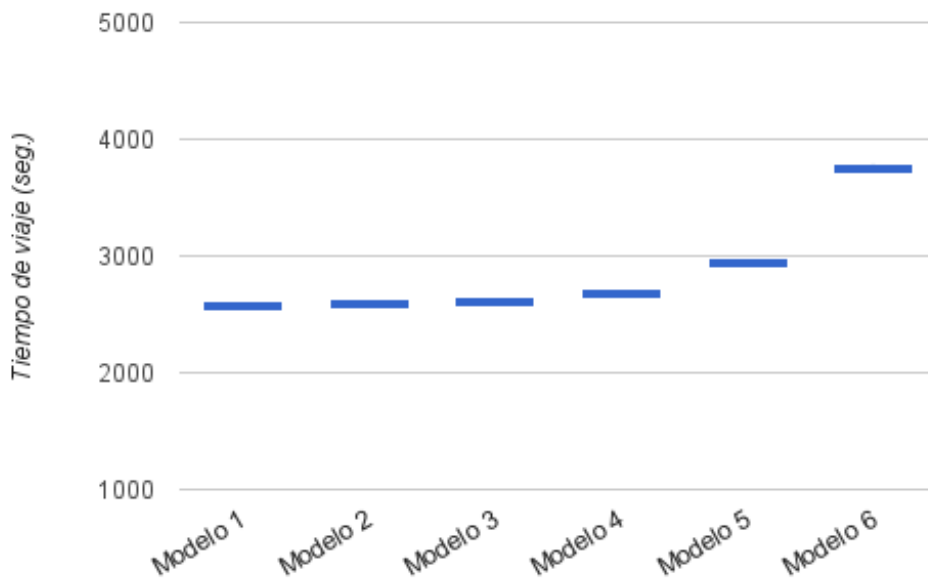


Gráfico 5.1 - Tiempos de viajes promedios con intervalos de confianza

Los modelos 1, 2, 3 y 4 planifican su viaje en el momento pre-trip accediendo a la información de las tablas de horario. Esto les permite agendar la salida desde el hogar y reducir significativamente el tiempo de espera en parada. Al compararlos con los modelos 5 y 6 vemos cuan mejores son los resultados obtenidos. La eficiencia de estos modelos se ve impactada en función de la regularidad con la que el ómnibus realice el recorrido y en el tiempo de anticipación con el que salga el pasajero de su origen.

El segundo elemento a comparar es cómo impacta el acceso a la información en tiempo real. Ésta es accedida por los pasajeros en los modelos 1, 2, 3 y 5. El Modelo 1 reporta los mejores tiempos de viaje, seguido por el Modelo 2, 3 y separado del resto el Modelo 5, cuyo análisis ya fue realizado más arriba. Todos los intervalos de confianza son disjuntos, por lo que podemos asegurar con relativa certeza de que efectivamente la estrategia de viaje empleada en el Modelo 1 reporta tiempos de viaje en promedio menores que el resto, el 2 que el 3 y así sucesivamente.

Es interesante notar que contar con información en tiempo real en el origen, sobre todas las líneas (Modelo 2), reporta mejores tiempos que tener información en tiempo real en todo momento para una única línea (Modelo 3), aunque la diferencia es pequeña. Entendemos que esto se debe a la alta regularidad con la que los ómnibus realizan los recorridos.

Estos resultados eran esperables, ya que cuando el pasajero tiene acceso a información en su casa puede agendar su salida para cuando sea prudente, disminuyendo sustancialmente su tiempo de espera en parada. También es esperable que el Modelo 1 sea el que reporta menores tiempos de viaje ya que una vez en la parada se puede adaptar a los cambios que ocurran desde

la estimación inicial y abordar una línea distinta a la elegida en origen. Esta disminución se puede ver claramente en los datos que se muestran en la Tabla 5.2, de tiempos de viaje promedio según etapa de viaje.

Modelo	Caminata a parada	Espera en parada	Tiempo sobre ómnibus	Caminata destino	Total
1 - Acceso constante a la información sobre todas las líneas	474,46	496,40	1161,06	445,22	2589,03
2 - Acceso a la información solo en origen	474,46	513,10	1169,49	455,55	2612,59
3 - Acceso a la información para una única línea	491,68	487,17	1173,18	473,33	2625,36
4 - Sin información usando tabla de horarios estática	473,13	595,06	1169,50	455,60	2693,29
5 - Acceso a la información solamente en parada	453,90	880,21	1166,44	459,79	2960,34
6 - Sin información ponderando por frecuencia	453,90	946,76	1860,92	517,17	3778,66

**Tabla 5.2 - Tiempos de viaje promedio según etapa de viaje**

En la tabla se ve que si bien todos los valores van creciendo, a medida que el pasajero tiene menos información sobre el sistema, el crecimiento del tiempo de espera en parada crece en mucho mayor proporción para los modelos en los que el pasajero no agenda la salida desde su casa (modelos 5 y 6).

Analizando gráficamente (ver gráfico 5.2), se puede ver más fácilmente que los tiempos de espera en parada para los modelos que evalúan la información en pre-trip son bastante similares, pese a que algunas realizan el acceso en tiempo real y otras no. Esto podría verse como un reflejo de que los ómnibus del sistema de transporte se aproximan bastante a los tiempos planificados por la tabla de horarios en este experimento. En el Experimento 2 se estudiará específicamente la incidencia de este factor.

Por último, se puede ver cuánto reduce el tiempo de viaje total el agendar la salida desde el hogar y que es mejor hacerlo con información en tiempo real que con información estática. A su vez, elegir con inteligencia qué línea abordar reporta mejores resultados que rápidamente tomar la primer línea que lleva a destino. Esto se ve en el tiempo de viaje en ómnibus del Modelo 6 y si bien la diferencia es pequeña, el Modelo 5 al contar con información en tiempo real en parada, tiene tiempo de viaje en ómnibus menor al Modelo 4.

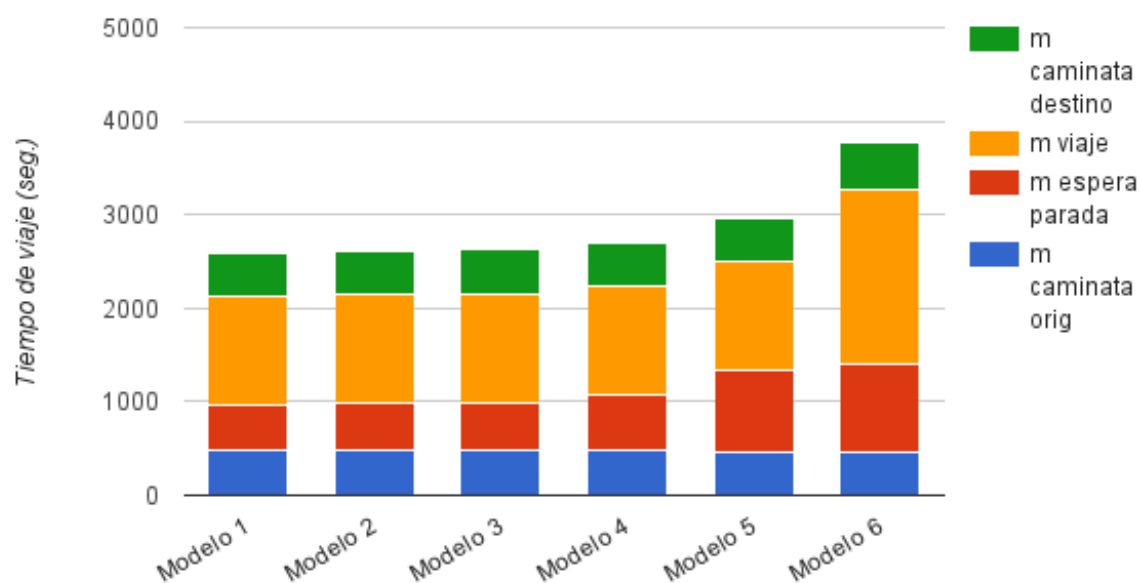


Gráfico 5.2 - Tiempos de viaje promedio según etapa de viaje

Las conclusiones obtenidas se refuerzan a la hora de analizar la tabla de tiempos de viaje promedio para cada par origen-destino. A continuación se muestra la Tabla 5.3 y el Gráfico 5.3 de tiempo de viaje total, para 5 pares origen-destino específicos. Los pares elegidos son el que tiene tiempo de viaje más corto, el más largo, y tres al azar.

Nodo origen	Nodo destino	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
59	54	1173,99	1496,90	1457,33	1551,92	1712,33	3696,29
58	51	2505,65	2486,79	2486,79	2518,87	2586,42	3359,39
74	72	2977,89	3115,35	3115,35	3114,68	4509,83	4509,83
0	2	3465,71	3503,85	3503,85	3503,85	3504,19	3711,33
38	43	4955,71	5661,72	5664,95	5675,25	4764,74	6353,46

Tabla 5.3 - Tiempos de viaje promedios por par origen-destino

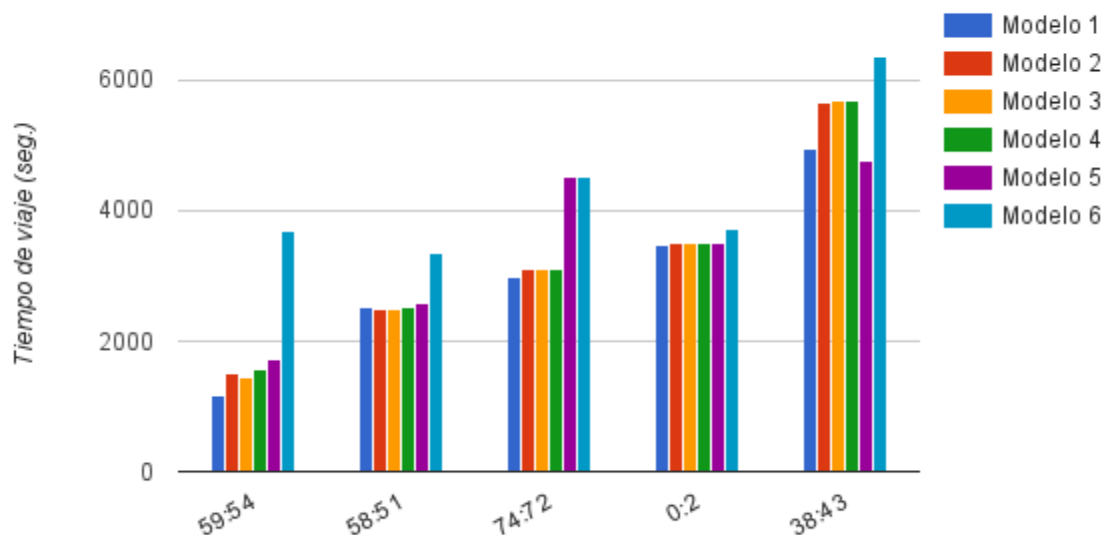


Gráfico 5.3 - Tiempos de viaje promedio por par origen-destino

A partir del Gráfico 5.3 se puede ver que la incidencia de los factores nombrados, aplica sin importar el largo del viaje, pues los gráficos específicos (salvo excepciones), son muy similares al Gráfico 5.2 que representa a los promedios, tanto en viajes cortos como en viajes largos.

Además de la comparación entre los promedios, se planteó como ejercicio la comparación entre los histogramas totales de tiempo de viaje para los modelos que arrojan mejor y peor tiempo promedio. La comparativa entre estos gráficos se ve en el Gráfico 5.4.

En el Gráfico 5.4 se puede ver que el Modelo 1 dibuja una campana con mayor cantidad de pasajeros aglomerados en menos tiempo de viaje, y disminuyendo rápidamente. De esto se puede concluir que en el Modelo 1, los pasajeros viajan en menores tiempos, y además son muy pocos los que demoran mucho.

El gran porcentaje de esta mejora en tiempo es fácil de ver si comparamos los histogramas de tiempo de espera en parada, como se muestra en el Gráfico 5.5.

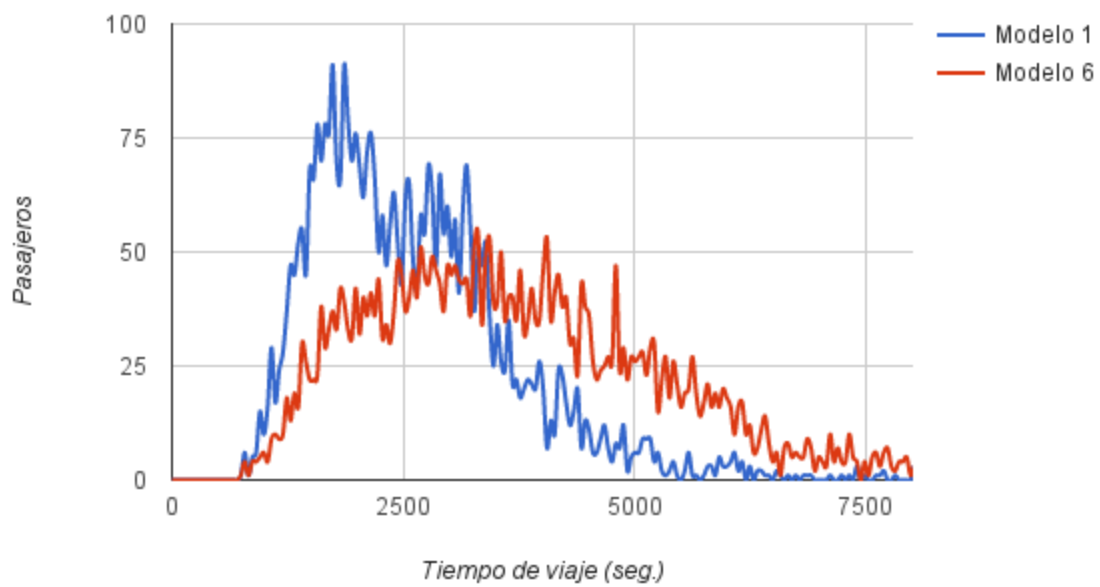


Gráfico 5.4 - Histograma tiempo total de viaje



Gráfico 5.5 - Histograma tiempo de espera en parada



Si se proyectan estos resultados en el Sistema de Transporte de Montevideo, en donde se considera que las líneas de ómnibus se comportan bastante similar a lo planificado salvo excepciones, se podría asegurar que el acceso a sistemas como el “Como Ir” o la página web de la Intendencia de Montevideo, donde se consulta la tabla de horarios estática de las distintas líneas, mejora mucho el viaje de un pasajero, comparado con el resultado obtenido al ir a la parada directamente según su intuición sobre la frecuencia de los ómnibus. Pensando a futuro, pareciera que agregar información en tiempo real en estos sistemas incidirá de forma favorable al pasajero. Pero alcanza para tener una gran mejora que la gente usara la tabla de horario estática, con la que ya se obtienen tiempos de viaje significativamente menores.

Observando los buenos resultados que arroja el modelo implementado de “acceso a la información para una única línea” (Modelo 3), se puede ver al sistema de consulta “iBus” como una buena opción ya que se obtienen resultados similares a los de “acceso constante a información sobre todas las líneas” (Modelo 1). A su vez es fácilmente accesible, para pasajeros dispuestos a asumir los costos económicos del mismo. Esto se puede ver en la Tabla 5.2, donde el modelo mencionado obtiene resultados apenas por debajo del de “acceso constante a información sobre todas las líneas” y muy similares a “acceso a la información solo en origen”.

### 5.2.2. Experimento 2 - Efecto de la regularidad de los ómnibus en el sistema de transporte, sobre los tiempos totales

Con los resultados del experimento anterior se pudo ver que en la simulación, los ómnibus se comportaron de forma bastante similar a la planificada. Se puede plantear como hipótesis, que si los ómnibus realizan el recorrido apegándose a los tiempos estimados en la tabla de horario estática, los modelos basados en la planificación según la tabla de horario, tanto estática como dinámica, van a dar menores tiempos de viaje total. En este experimento se estudió efectivamente la incidencia de la regularidad de los ómnibus del sistema de transporte, sobre los tiempos totales de viaje en los diferentes modelos.

En el experimento anterior, los tiempos de demora o adelanto de los ómnibus, se obtienen a partir del sorteo de una distribución normal. Para generar un sistema de transporte más irregular, se cambió esta distribución por una exponencial negativa.

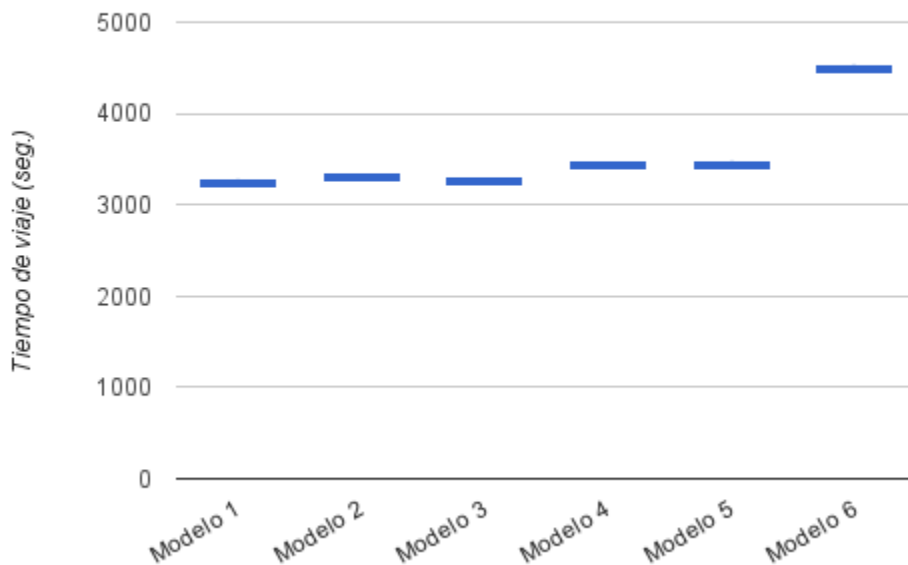
Del experimento se espera que empeore los tiempos totales de viaje de los modelos que agendan la salida. Este cambio se explicaría principalmente por la probabilidad de que el ómnibus que el pasajero desea tomar pase antes de lo planificado por la parada. Se esperaba que afecte más severamente al Modelo 4 ya que este solo cuenta con la información estática de la tabla de horarios para agendar la salida.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.4 y Gráfico 5.6.

Modelo	Media	Intervalo de confianza
--------	-------	------------------------

1 - Acceso constante a la información sobre todas las líneas	3277,12	5,14
2 - Acceso a la información solo en origen	3337,78	4,83
3 - Acceso a la información para una única línea	3282,83	5,09
4 - Sin información usando tabla de horarios estática	3472,12	4,88
5 - Acceso a la información solamente en parada	3475,01	5,34
6 - Sin información ponderando por frecuencia	4527,04	7,23

**Tabla 5.4 - Tiempos de viaje promedio con intervalos de confianza**



**Gráfico 5.6 - Tiempos de viaje promedio con intervalos de confianza**

A partir del cálculo de las medias y los intervalos de confianza identificamos que los modelos se agrupan en 4 conjuntos, por un lado el Modelo 1 y 3, seguido por el 2, luego el 4 y 5 y finalmente el 6.

El primer grupo reporta los mejores tiempos de viaje. Como elemento en común tienen el acceso a información tanto en origen como en parada. De esta forma, una vez llegan a la parada logran adaptarse mejor a la situación de transporte irregular, cambiar su decisión inicial y abordar el ómnibus más conveniente. El Modelo 1 cuenta con más información para adaptarse que el 3, pero no se puede asegurar que sea mejor que el 3 ya que sus intervalos de confianza se cruzan.

Al comparar el Modelo 2 con el 1 vemos que una diferencia de 20s aproximadamente que se daba en la situación normal pasa a ser de casi 100s. Al contar con solo información en el origen, por más que esta sea en tiempo real, una vez que el pasajero sale del origen, la realidad diverge lo suficiente de lo estimado como para que tenga un impacto significativo en la predicción.

En siguiente lugar se ubican los modelos 4 y 5. El Modelo 4 emplea la tabla de horarios estática para agendar la salida desde el hogar. La irregularidad del sistema impacta negativamente en esta estimación inicial por lo que el viaje empeora respecto al experimento anterior. En el caso del Modelo 5, evalúa inicialmente a partir de la frecuencia pero una vez en parada puede elegir mejor qué ómnibus tomar. Es interesante notar que sigue siendo mejor en este escenario contar con mejor información en el origen que en la parada.

Finalmente el Modelo 6 sigue siendo marcadamente peor que el resto.

Procedemos a estudiar más detalladamente los tiempos para cada uno de los segmentos del viaje en la Tabla 5.5 y Gráfico 5.7.

Modelo	Caminata a parada	Espera en parada	Tiempo sobre ómnibus	Caminata destino	Total
1 - Acceso constante a la información sobre todas las líneas	478,52	912,24	1410,70	445,37	3277,12
2 - Acceso a la información solo en origen	478,52	986,25	1417,65	455,36	3337,78
3 - Acceso a la información para una única línea	493,22	893,80	1424,22	471,59	3282,83
4 - Sin información usando tabla de horarios estática	473,13	1134,21	1409,17	455,60	3472,12
5 - Acceso a la información solamente en parada	453,90	1150,95	1410,76	459,40	3475,01
6 - Sin información ponderando por frecuencia	453,90	1241,03	2321,29	512,50	4527,04

**Tabla 5.5 - Tiempo de viaje promedio según etapa de viaje**

Podemos ver cómo la mayor diferencia entre los tiempos de recorrido de los distintos modelos se encuentra en el tiempo de viaje del Modelo 6, ratificando la idea de que el método de tomar el primer ómnibus que lleva a destino no es una buena estrategia.

La Tabla 5.6 y Gráfico 5.8 muestran una comparación entre las medias totales obtenidas usando distribución normal (en el Experimento 1) y exponencial negativa (en el Experimento 2).

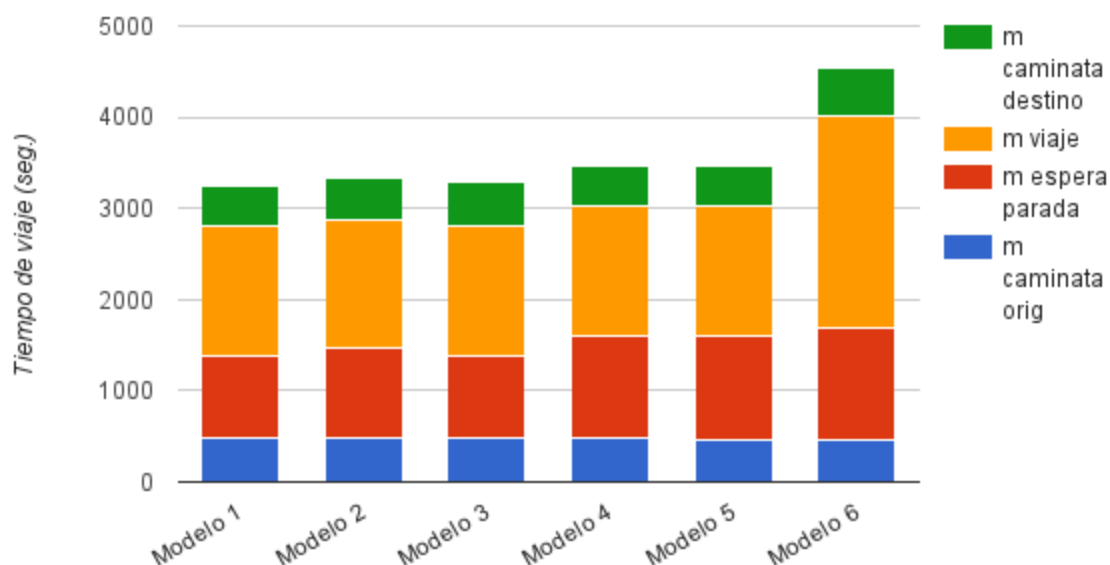


Gráfico 5.7 - Tiempo de viaje promedio según etapa de viaje

Todos los modelos se vieron perjudicados ante el cambio en la distribución. La pérdida de eficiencia en los modelos se vio más pronunciada para aquellos que agendan la salida desde el origen. Particularmente el que presentó un incremento porcentual mayor en el tiempo de viaje es el Modelo 4, que emplea una tabla de horarios estática, acumulando así todas las variaciones entre arribos de parada a parada que se van dando en el recorrido. Los modelos que acceden a información en tiempo real para la elección en el pre-trip cuentan con información parcialmente actualizada atenuando así este impacto.

	Dist. normal	Dist. neg-exp	Dif %
Modelo 1	2589,03	3277,12	26,57
Modelo 2	2612,59	3337,78	27,75
Modelo 3	2625,36	3282,83	25,04
Modelo 4	2693,29	3472,12	28,91
Modelo 5	2960,34	3475,01	17,38
Modelo 6	3778,66	4527,04	19,80

Tabla 5.6 - Tiempo de viaje promedio según distribución de probabilidad

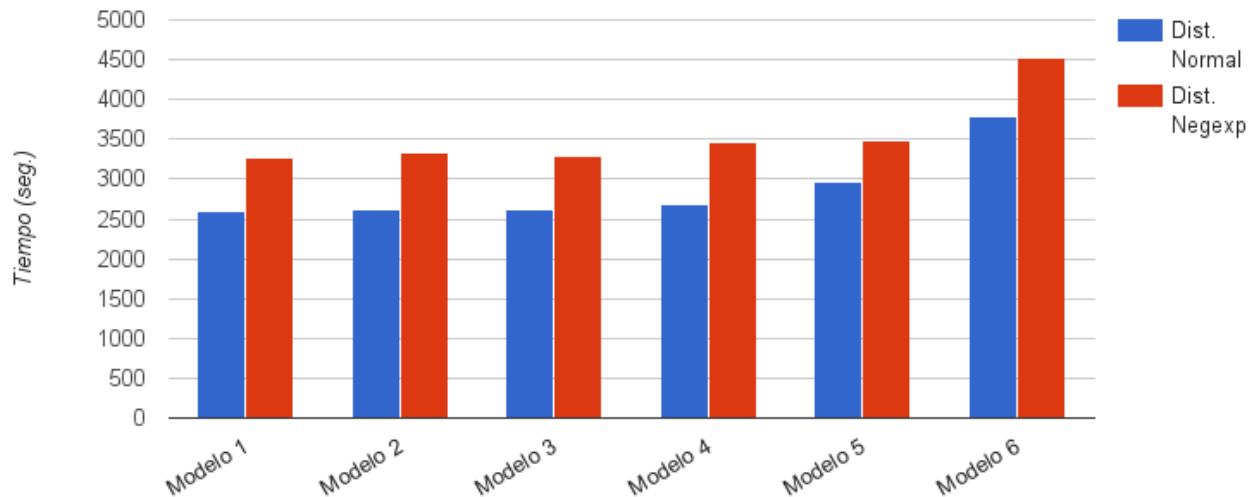


Gráfico 5.8 - Tiempo de viaje promedio según distribución de probabilidad

En la Tabla 5.7 y Gráfico 5.9 se compara específicamente el tiempo de espera en parada usando distribución normal (en el Experimento 1) y exponencial negativa (en el Experimento 2).

	Dist. normal	Dist. neg-exp	Dif %
Modelo 1	496,40	912,24	83,77
Modelo 2	513,10	986,25	92,21
Modelo 3	487,17	893,80	83,46
Modelo 4	595,06	1134,21	90,60
Modelo 5	880,21	1150,95	30,75
Modelo 6	946,76	1241,03	31,08

Tabla 5.7 - Tiempo de espera en parada promedio según distribución de probabilidad

Detectamos un incremento de casi el doble de tiempo de espera en parada para aquellos modelos que agendan la salida de la casa. Entre ellos se destacan los modelos 2 y 4.

El Modelo 2 cuenta con información en tiempo real en el origen, y una vez que elige una línea se apegue a dicha elección y no evalúa en parada qué ómnibus tomar, por lo que no se adapta a la situación en tiempo real una vez que este llega a la parada. El Modelo 4 se comporta igual, salvo que la información que emplea en el origen es estática. Esta diferencia, que para el experimento anterior no era tan significativa, ahora pasa a cobrar mayor importancia y contribuye a que no empeoren tanto los tiempos.

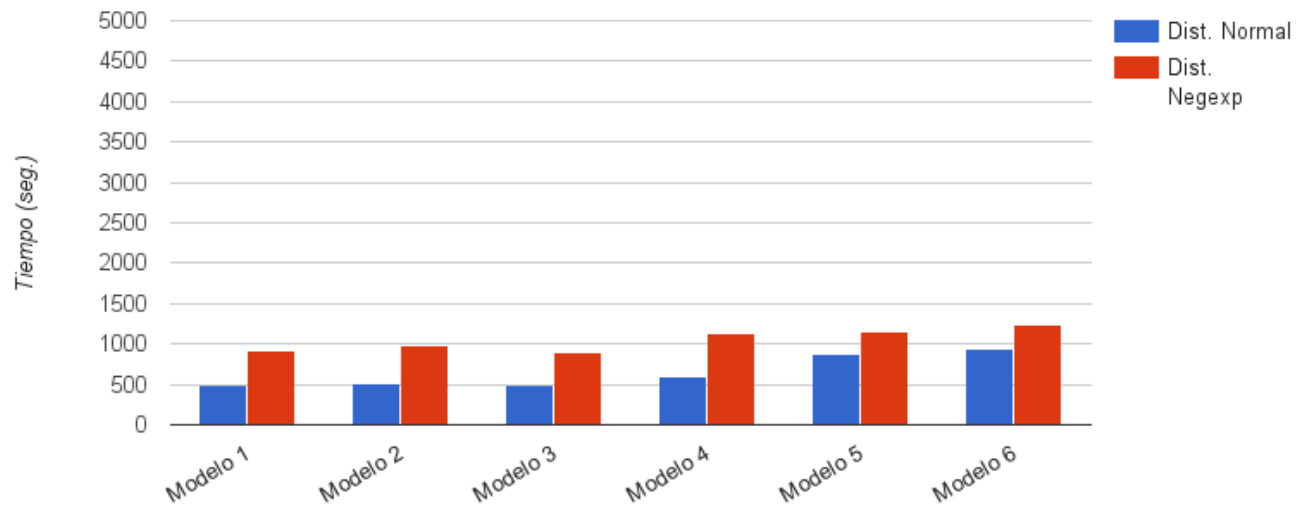


Gráfico 5.9 - Tiempo de espera en parada promedio según distribución de probabilidad

En la Tabla 5.8 y Gráfico 5.10 se comparan las medias de tiempo de viaje en ómnibus usando distribución normal (en el Experimento 1) y exponencial negativa (en el Experimento 2).

	Dist. normal	Dist. neg-exp	Dif %
Modelo 1	1161,06	1410,70	21,50
Modelo 2	1169,49	1417,65	21,21
Modelo 3	1173,18	1424,22	21,39
Modelo 4	1169,50	1409,17	20,49
Modelo 5	1166,44	1410,76	20,94
Modelo 6	1860,92	2321,29	24,73

Tabla 5.8 - Tiempo de viaje en ómnibus promedio según distribución de probabilidad

Existe un aumento homogéneo en los tiempos de viaje en ómnibus, del orden del 21%. Para analizar qué factores inciden en este aumento, se realizó un estudio sobre el impacto de la distribución exponencial negativa en los tiempos de realización de los recorridos por los ómnibus. A partir de la comparación de los tiempos estáticos y dinámicos en todas las tablas de horario, para la última parada del recorrido, se calculó en promedio un aumento de sólo un 3% en los tiempos de viaje. Por un lado esto ratifica la correctitud de la distribución exponencial negativa, ya que dado un gran número de valores, estos se mantienen cercanos a la media. Es decir, los tramos para los cuales aumenta el tiempo casi se equiparan con tramos para los que disminuye tiempo. Pero este pequeño incremento no es suficiente para explicar la diferencia en los tiempos de viaje en ómnibus.

Conjeturamos que para las parejas O-D de los datos de entrada ocurren un mayor número de tramos de mayor tiempo que de menor.

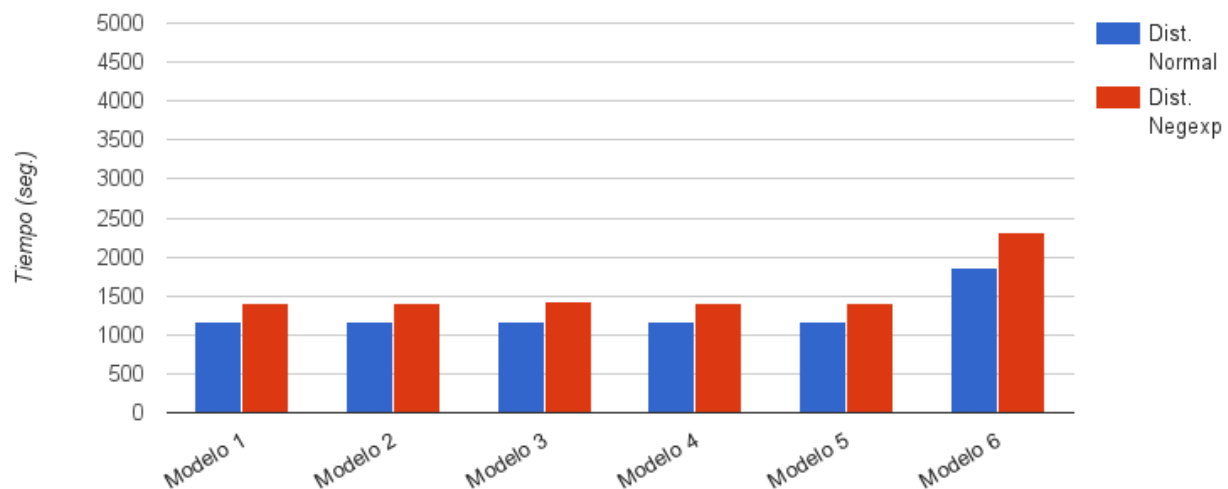


Gráfico 5.10 - Tiempo de viaje en ómnibus promedio según distribución de probabilidad

### 5.2.3. Experimento 3 - Escenario de un sistema de transporte de muy altas frecuencias

Es necesario tener en cuenta que las frecuencias de las líneas de Rivera son bajas. Ésto tiene un impacto negativo en los modelos que no agendan salida desde el hogar. Los tiempos de espera en parada pueden ser del orden de 30 ~ 40 minutos. En este experimento se estudia la incidencia de muy altas frecuencias en un sistema de transporte para así contrastarlo con el de Rivera, donde las salidas de los ómnibus son cada 20, 30, 40 y 60 minutos, dependiendo de la línea. Para la ejecución del mismo, se modifica la frecuencia de cada línea, bajando el tiempo entre salidas a una cuarta parte del original. Esperamos que al aumentar significativamente la frecuencia no se vean tan perjudicados los modelos que no agendan la salida desde el origen. Y obtener información del comportamiento de los modelos en un escenario con mayores cambios de estado en el período de estudio.

Mostramos los resultados obtenidos en la Tabla 5.9 y Gráfico 5.11 y con el recorrido desglosado en la Tabla 5.10 y Gráfico 5.12.

Una vez más se identifican 2 grupos dentro de los modelos, siendo el Modelo 6 a través del cual se obtienen peores valores. La media es mejor para los modelos 1, 2 y 3 pero la diferencia entre ellos es prácticamente nula.

Modelo	Media	Intervalo de confianza
1 - Acceso constante a la información sobre todas las líneas	2389,26	2,54
2 - Acceso a la información solo en origen	2393,26	2,46
3 - Acceso a la información para una única línea	2399,17	2,65
4 - Sin información usando tabla de horarios estática	2439,69	2,51
5 - Acceso a la información solamente en parada	2423,92	2,41
6 - Sin información ponderando por frecuencia	3135,37	3,62

Tabla 5.9 - Tiempos de viaje promedio con intervalos de confianza

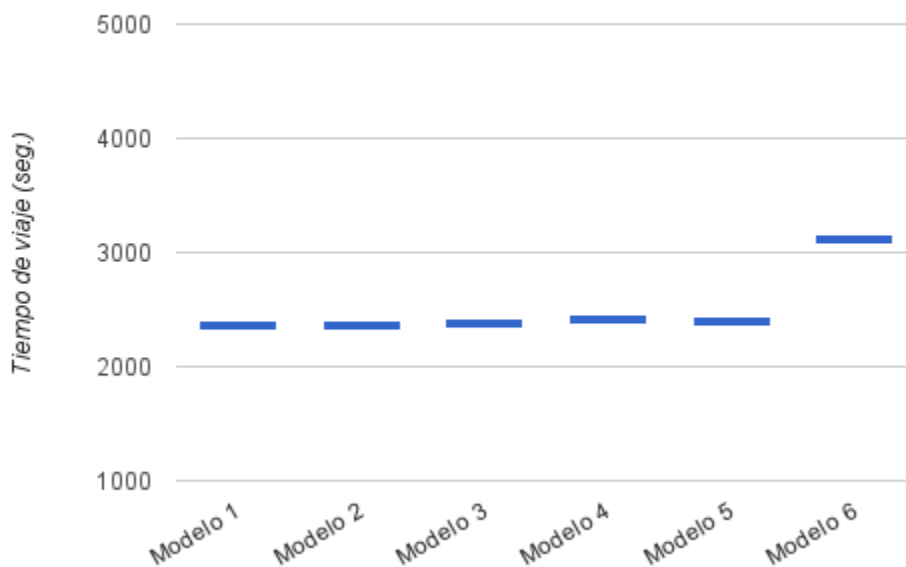


Gráfico 5.11 - Tiempos de viaje promedio con intervalos de confianza

Modelo	Caminata a parada	Espera en parada	Tiempo sobre ómnibus	Caminata destino	Total
1 - Acceso constante a la información sobre todas las líneas	95,32	449,94	1182,71	314,56	2389,26
2 - Acceso a la información solo en origen	95,40	449,94	1175,56	329,16	2393,26
3 - Acceso a la información para una única línea	95,52	476,41	1175,56	308,04	2399,17
4 - Sin información usando tabla de horarios estática	96,33	448,18	1173,13	379,89	2439,69
5 - Acceso a la información solamente en parada	96,01	428,51	1174,31	382,13	2423,92
6 - Sin información ponderando por frecuencia	109,20	428,51	1793,36	399,29	3135,37

Tabla 5.10 - Tiempo de viaje promedio según etapa de viaje



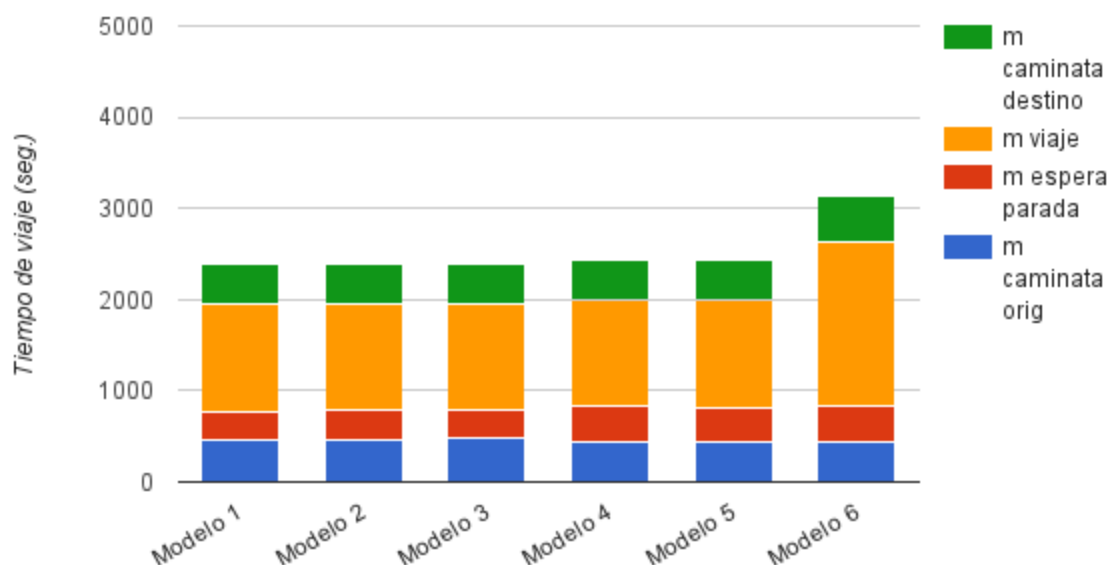


Gráfico 5.12 - Tiempo de viaje promedio según etapa del viaje

Para todos los modelos vemos tiempos de caminatas y espera similares. La principal variación es en el tiempo de viaje del Modelo 6. Una vez más se detecta que la opción de tomar el primer ómnibus que lleva a destino impacta negativamente en el viaje.

En este escenario se acentúa dicho impacto ya que para cualquier ómnibus, los tiempos de espera son bajos, por lo que dejar pasar un ómnibus para tomar uno de mejor recorrido casi no impacta negativamente en el tiempo total de viaje.

La Tabla 5.11 y el Gráfico 5.13 muestran una comparación entre el funcionamiento con la frecuencia real de Rivera (empleada en el Experimento 1) y alta frecuencia (definida para este experimento).

	Frecuencia original	Frecuencia alta	Dif %
Modelo 1	2589,03	2389,26	7,72
Modelo 2	2612,59	2393,26	8,40
Modelo 3	2625,36	2399,17	8,62
Modelo 4	2693,29	2439,69	9,42
Modelo 5	2960,34	2423,92	18,13
Modelo 6	3778,66	3135,37	17,03

Tabla 5.11 - Tiempos de viaje promedio según frecuencia

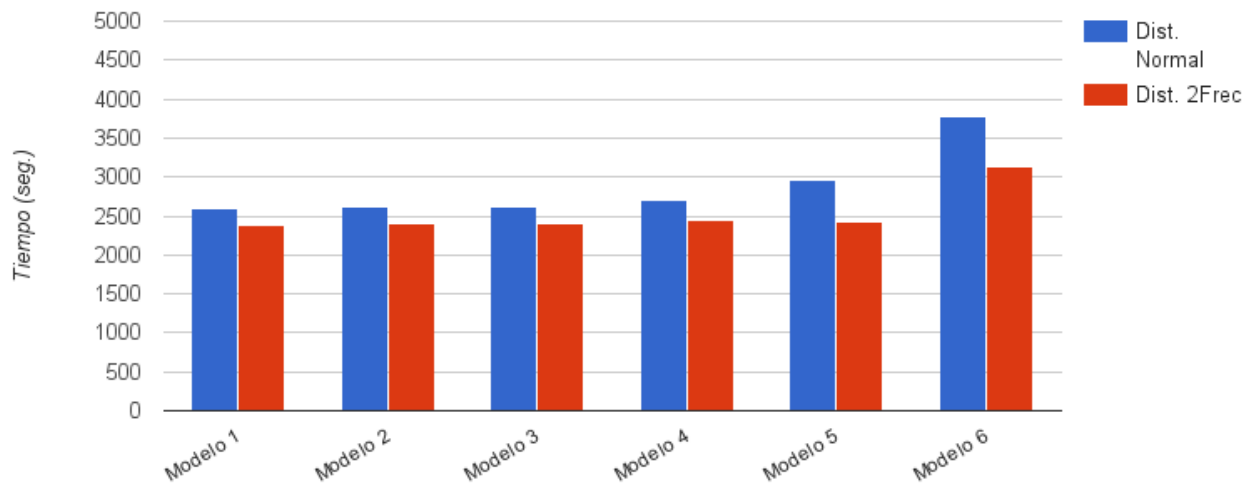


Gráfico 5.13 - Tiempos de viaje promedio según frecuencia

En todos los casos detectamos una mejora en la performance de los modelos respecto a la situación normal del sistema, lo que es esperable porque mejoran las frecuencias.

	Frecuencia normal	Frecuencia alta	Dif %
Modelo 1	496,40	314,56	36,64
Modelo 2	513,10	329,16	35,85
Modelo 3	487,17	308,04	36,77
Modelo 4	595,06	379,89	36,16
Modelo 5	880,21	382,13	56,59
Modelo 6	946,76	399,29	57,83

Tabla 5.12 - Tiempo de espera en parada promedio según frecuencia

Como se puede ver en la Tabla 5.12 y en el Gráfico 5.12, en los tiempos de espera en parada se detecta la mayor diferencia entre los experimentos. Disminuye en mayor grado para el Modelo 6 ya que toma el primer ómnibus que pase y lo lleve a destino. Otro punto interesante es comparar los modelos 2 y 4, ambos eligen la línea a tomar en el origen, luego agendan la salida desde el origen y una vez en la parada toman el ómnibus que pase y pertenezca a la línea elegida. La diferencia es que el Modelo 2 emplea información en tiempo real en el origen por lo que estima mejor el momento a salir. Al aumentar la frecuencia, dicha brecha de estimación se ha achicado, favoreciendo más al Modelo 4. De todas formas el Modelo 2 tiene una media menor.

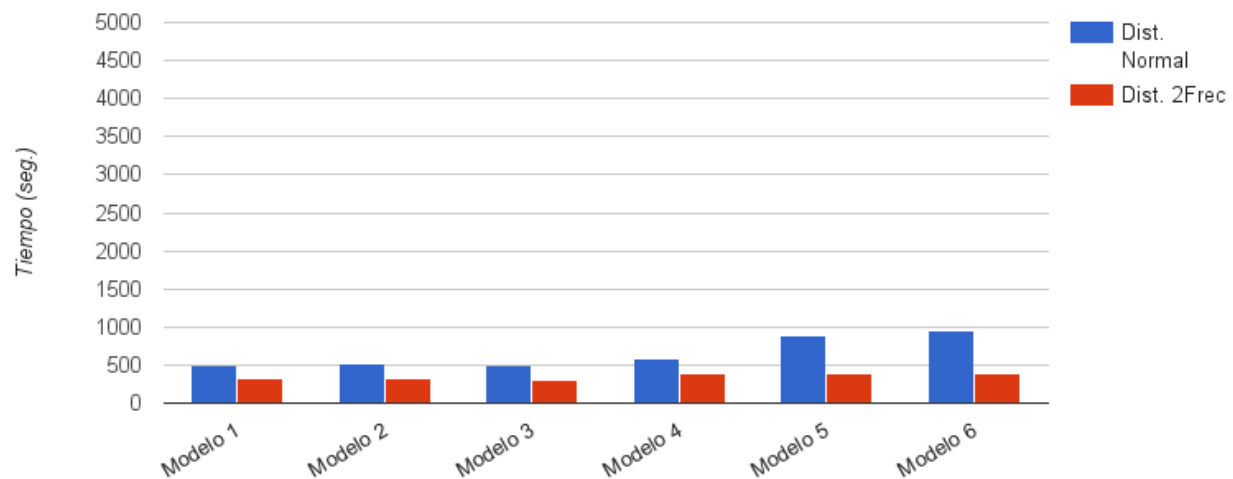


Gráfico 5.14 - Tiempo de espera en parada promedio según frecuencia

	Frecuencia normal	Frecuencia alta	Dif %
Modelo 1	1161,06	1182,71	1,86
Modelo 2	1169,49	1175,56	0,51
Modelo 3	1173,18	1175,56	0,20
Modelo 4	1169,50	1173,13	0,31
Modelo 5	1166,44	1174,31	0,67
Modelo 6	1860,92	1793,36	3,64

Tabla 5.13 - Promedio de tiempo de viaje en ómnibus según frecuencia

El incremento de las frecuencias no genera impactos significativos en los tiempos de viaje en ómnibus, como es mostrado en la Tabla 5.13 y en el Gráfico 5.15. Esto tiene sentido ya que no se modificó el trazado de los recorridos.

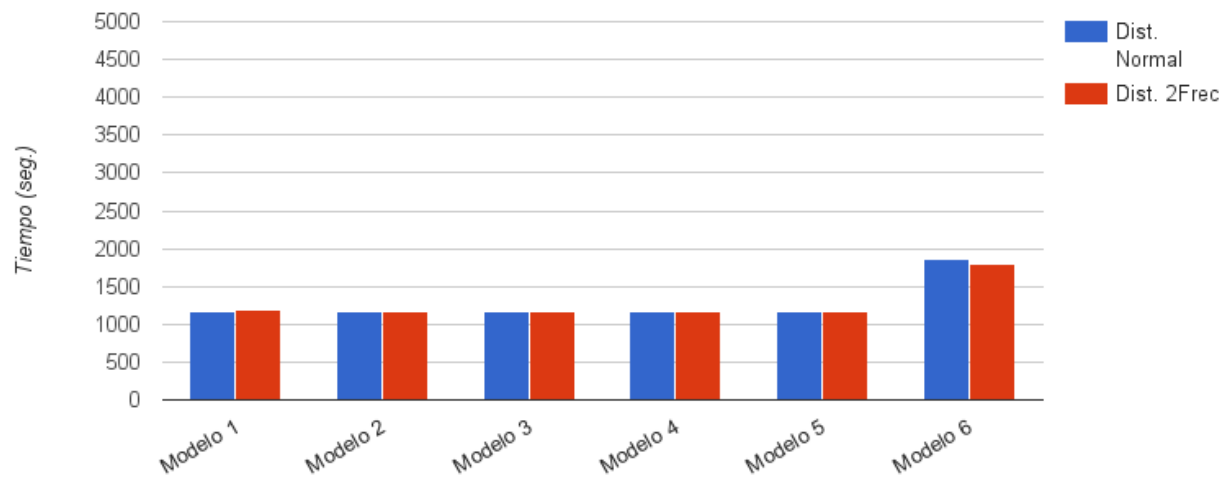


Gráfico 5.15 - Promedio de tiempo de viaje en ómnibus según frecuencia

## 6. Conclusiones y trabajos a futuro

### 6.1. Conclusiones

A partir del trabajo realizado se puede concluir que se cumplieron los objetivos del proyecto, ya que el simulador construido logra plasmar varios de los servicios de sistemas de información en tiempo real estudiados, transformándolo en una buena herramienta para estudiar la incidencia de los mismos en el comportamiento de un pasajero estándar del sistema de transporte público.

De los resultados del proyecto se confirma que el acceso a la información en tiempo real es importante, pero no es el factor fundamental para mejorar los tiempos de viaje. La planificación del viaje desde el origen es el factor más relevante a la hora de optimizar el mismo. Si a su vez, estos factores se mezclan, conforman el escenario ideal para un pasajero, solo mejorado si el mismo dispone de algún medio de acceso a la información a lo largo de todo el viaje.

A partir de los experimentos realizados también podemos afirmar que las ventajas que presentan los modelos descritos siguen siendo válidas, aunque disminuyen las diferencias, en escenarios extremos como son los que tienen grandes irregularidades al cumplir con la tabla de horarios planificada o escenarios con altas frecuencias de los ómnibus. En el primer escenario se ven afectados principalmente aquellos modelos que agendan la salida desde el hogar, aunque siguen siendo mejores que los otras. En el escenario de altas frecuencias se emparejan las ventajas reportadas por agendar la salida desde el hogar; el sistema sigue obteniendo mejores resultados para modelos que utilicen la planificación pre viaje, mejores aún para quienes utilicen información en tiempo real, aunque las diferencias se acortan.

Respecto al desarrollo del proyecto, una decisión de impacto significativo a la hora de realizar la implementación fue por cual modelo comenzar. Se optó por implementar primero el modelo que provee acceso a la información en todo el viaje. Ésta fue identificada como la de mayor dificultad a la toma de decisiones del pasajero, en cada paso del viaje, por lo que tenía mayor complejidad algorítmica. Si bien la obtención de los primeros resultados válidos no fue inmediata, por la dificultad que implicó verificar y validar el sistema, pensamos que la decisión fue acertada, ya que una vez construida la base del simulador con su modelo inicial que abarca todos los posibles accesos del pasajero a la información en tiempo real, implementar el resto de los modelos fue mucho más simple, ya que las partes más complejas de su desarrollo eran análogas a distintas partes del modelo inicial.

La extensión del simulador trajo a su vez una mejora en la performance del mismo. Esta mejora permite por ejemplo facilitar el estudio estadístico, ya que se pueden realizar un número mayor de experimentos en igual cantidad de tiempo. Además se logró crear scripts que sistematizan todas las ejecuciones del simulador, de forma de facilitar la ejecución de nuevos experimentos.

Finalmente, es importante mencionar que los resultados de este proyecto de grado constituyen el cuerpo fundamental del artículo “Experimental evaluation of real-time information services in

transit systems from the perspective of users” de Pablo Banchero, Matías Estrada, Ricardo Giesen, Antonio Mauttone, Emilio Nacelle y Leandro Segura, aceptado para ser presentado en la Conference on Advanced Systems for Public Transportation, [12].

## 6.2. Trabajos a futuro

Como trabajos a futuro se plantean:

- Simular caso más grande, por ejemplo Montevideo.
- Implementar modelos de comportamiento más complejos (que incluyan por ejemplo transbordos).

Simular Montevideo servirá para probar al simulador con un volumen grande de datos y una realidad sustancialmente más compleja. Pasamos de tener 13 líneas y proveer servicios a 65.000 habitantes a tener unas 140 líneas y de proveer servicios a 1.300.000 habitantes aproximadamente. Una vez constatado si el simulador puede soportar esta carga de información y se contrastan los resultados obtenidos de la simulación con la realidad, podría pasar a ser una excelente herramienta a la hora de evaluar mejoras y cambios en el sistema de transporte metropolitano en Montevideo.

El gran problema que se presenta es recabar la información para la construcción de la matriz origen-destino donde se refleja la información de cómo se mueve la población en la ciudad. Esta tarea se realizó manualmente en Rivera, con gente realizando encuestas en las paradas, pero la escala de Montevideo hace que este enfoque sea poco práctico.

Agregar la posibilidad de que los pasajeros calculen transbordos para realizar el viaje permitirá, por un lado que accedan a destinos que considerando solo viajes simples no alcanzan, y también que potencialmente puedan calcular viajes de menor duración que si realizan el viaje empleando solo una línea. Con los cambios realizados en el sistema, particularmente la creación de la tabla de horarios, consideramos que si bien es complejo se cuentan con todas las herramientas necesarias para implementar este comportamiento. Además de implementar la funcionalidad se debe de evaluar cómo se realizarán los transbordos. Parecería coherente que emplee dos líneas para realizar el viaje, y no tanto, evaluar en cada parada en la que vaya haciendo el recorrido todos los posibles viajes directos y por transbordo posibles.

# Bibliografía

- [1] W. Lam and M. Bell, *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*. Pergamon, 2003.
- [2] “Android.” [Online]. Available: <http://www.android.com/>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [3] “A qué hora pasa.” [Online]. Available: <http://www.montevideo.gub.uy/aquehorapasa/aquehorapasa.html>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [4] “Ayuntamiento de Zaragoza. Cómo Moverse en Transporte Público.” [Online]. Available: <http://www.zaragoza.es/ciudad/viapublica/movilidad/como-ir/>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [5] A. de Z. U. de G. de la W. M. webmunicipal@ayto-zaragoza.es, “Ciudad de Zaragoza.” [Online]. Available: <http://www.zaragoza.es/sedeelectronica/>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [6] “Cómo ir.” [Online]. Available: <http://comoir.montevideo.gub.uy/>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [7] “Consortio Regional de Transportes de Madrid.” [Online]. Available: <http://www.crtm.es/>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [8] “C.U.T.C.S.A. // Compañía Uruguaya de Transportes Colectivos S.A. // Página de Inicio.” [Online]. Available: <http://www.cutcsa.com.uy/informacion/inicio.php>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [9] E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, and J. Vlissides, *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Pearson Education, 1994.
- [10] O. Cats, H. N. Koutsopoulos, W. Burghout, and T. Toledo, “Effect of real time transit Information on dynamic path choice of passengers,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2217, no. 1, pp. 46–54, 2011.
- [11] S. Alaggia, “EOSimulator: Main Page.” [Online]. Available: [http://www.fing.edu.uy/inco/cursos/simulacion/eosim\\_html/index.html](http://www.fing.edu.uy/inco/cursos/simulacion/eosim_html/index.html). [Accessed: 19-May-2015].
- [12] P. Banchemo, M. Estrada, R. Giesen, A. Mauttone, E. Nacelle, and L. Segura, “Experimental evaluation of real-time information services in transit systems from the

perspective of users.” presented at the Conference on Advanced Systems in Public Transport, Rotterdam, Netherlands, 2015.

- [13] A. Mauttone, M. E. Urquhart, and H. Martínez, “Frequency optimization in public transportation systems: Formulation and metaheuristic approach,” *European Journal of Operational Research*, vol. 236, no. 1, pp. 27–36, 2014.
- [14] “Google Maps,” *Google Maps*. [Online]. Available: <https://www.google.com.uy/maps/>. [Accessed: 21-Apr-2015].
- [15] “Google Maps Content Partners – Content Providers – Google Maps.” [Online]. Available: <http://maps.google.com/help/maps/mapcontent/transit/live-updates.html>. [Accessed: 21-Apr-2015].
- [16] M. V. López, P. C. Lorenzo, and P. Medina, “Herramientas para la simulación del transporte público urbano colectivo.” Proyecto de grado, Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2012.
- [17] “iBus // Ya no lo esperarás, ahora sabés cuándo te pasa a buscar.” [Online]. Available: <http://ibus.com.uy/index.html>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [18] D. Graffox, “IEEE Citation Reference,” 2009. [Online]. Available: <http://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf>. [Accessed: 15-Nov-2014].
- [19] “Live map of London Underground trains.” [Online]. Available: <http://traintimes.org.uk/map/tube/>. [Accessed: 21-Apr-2015].
- [20] “LondonNut Android Apps.” [Online]. Available: <http://londonnut.com/apps/index.html>. [Accessed: 21-Apr-2015].
- [21] “Madrid transportes - Android Apps on Google Play.” [Online]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=es.vallecilloweb.madridtransportes&hl=en>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [22] A. Mauttone, “Models and algorithms for the optimal design of bus routes in public transportation systems,” Pedeciba Informática, Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2011.
- [23] “MontevideoBus.com.uy | Guía Online de los Ómnibus de Montevideo y sus Recorridos.” [Online]. Available: <http://www.montevideobus.com.uy/>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [24] “Movistar Uruguay.” [Online]. Available: <https://www.movistar.com.uy/Home.aspx>. [Accessed: 20-Apr-2015].




- [25] “OneBusAway.” [Online]. Available: <http://onebusaway.org/>. [Accessed: 21-Apr-2015].
- [26] H. Spiess and M. Florian, “Optimal strategies: a new assignment model for transit networks,” *Transportation Research Part B: Methodological* 23, no. 2, pp. 83–102, 1989.
- [27] G. Desaulniers and M. D. Hickman, “Public transit,” *Handbooks in operations research and management science*, no. 14, pp. 69–127, 2007.
- [28] P. Aldaz and G. De León, “Simulador de transporte público urbano colectivo,” Proyecto de grado, Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2010.
- [29] A. M. Law and W. D. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, 2 edition. New york: McGraw-Hill College, 1991.
- [30] R. Davies and R. O’Keefe, *Simulation Modelling with Pascal*. Prentice Hall, 1989.
- [31] “Sistema de Información Geográfica, Datos abiertos de la Intendencia Municipal de Montevideo.” [Online]. Available: <http://sig.montevideo.gub.uy/>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [32] “SoloBus,” *Facebook*. [Online]. Available: <https://www.facebook.com/solobusapp>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [33] “STM | Société de transport de Montréal.” [Online]. Available: <http://www.stm.info/en>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [34] “STM Montevideo.” [Online]. Available: <http://stm.matungos.com.uy/>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [35] “Unified Modeling Language (UML).” [Online]. Available: <http://www.uml.org/>. [Accessed: 19-May-2015].
- [36] Y. Sheffi, *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. Prentice-Hall, 1985.
- [37] “What is GTFS-realtime?” *Google Developers*. [Online]. Available: <https://developers.google.com/transit/gtfs-realtime/>. [Accessed: 21-Apr-2015].
- [38] A. Nuzzolo, A. Comi, U. Crisalli, and L. Rosati, “A new Advanced Traveler Advisory Tool based on personal user preferences,” in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on*, 2014, pp. 1561–1566.




# Apéndice A - Tablas de estudio de servicios de información en tiempo real para sistemas de transporte


## Solo Bus

	
Nombre sistema	SoloBus
Ciudad	Montevideo, Uruguay
Proveedor	Empresa SoloBus.
Momento de la consulta	Todo momento.
Información que provee	Tabla de horarios (estática), de una parada de ómnibus
Tecnologías	Android, SIG, GPS, Redes celulares, Wifi
Breve descripción	Se instala como una aplicación en el dispositivo móvil. A partir de una parada indicada en el SIG que despliega, realiza consultas sobre la tabla de horarios para esa parada.
Ventajas	El SIG puede utilizar la posición del GPS del móvil.
Desventajas	No agrega información en tiempo real sobre desvíos o atrasos de cada ómnibus. No detalla el recorrido del ómnibus.
Muestra Recorrido	NO
Posición Actual	NO
Info en tiempo real	NO
Accesible en viaje	SI
Time-Table	SI
Frecuencia	NO
Transbordos	NO
Customizable	NO


STM Montevideo

	
Nombre sistema	STM Montevideo
Ciudad	Montevideo, Uruguay
Proveedor	Matungos, <a href="http://stm.matungos.com.uy/">http://stm.matungos.com.uy/</a>
Momento de la consulta	Todo momento
Información que provee	Tabla de horarios estática de salida de ómnibus, Recorridos
Tecnologías	Android
Breve descripción	Permite la búsqueda de una línea, y muestra el horario de salida de la misma.
Ventajas	No precisa de conexión a datos en todo momento
Desventajas	Información estática.
Muestra Recorrido	NO
Posición Actual	NO
Info en tiempo real	NO
Accesible en viaje	SI
Time-Table	SI
Frecuencia	NO
Transbordos	NO
Customizable	NO


## Como Ir


	
Nombre sistema	Como Ir
Ciudad	Montevideo, Uruguay
Proveedor	Intendencia Municipal de Montevideo, <a href="http://www.montevideo.gub.uy/aplicacion/como-ir">http://www.montevideo.gub.uy/aplicacion/como-ir</a>
Momento de la consulta	Pre-trip
Información que provee	Líneas que son solución al problema de origen-destino, y horario en el cual pasa.
Tecnologías	Web
Breve descripción	Se elige un origen y un destino mediante el ingreso de direcciones. Se elige una de las líneas que el sistema provee y se ve el recorrido, y los horarios disponibles para esa línea.
Ventajas	No es necesario saber dónde están las paradas previamente.
Desventajas	No agrega información en tiempo real sobre desvíos o atrasos de cada ómnibus.
Muestra Recorrido	SI
Posición Actual	SI
Info en tiempo real	SI
Accesible en viaje	NO
Time-Table	SI
Frecuencia	NO
Transbordos	SI
Customizable	NO

## A qué hora pasa

	
Nombre sistema	A qué hora pasa
Ciudad	Montevideo, Uruguay
Proveedor	Intendencia Municipal de Montevideo - <a href="http://www.montevideo.gub.uy/aquehorapasa/aquehorapasa.html">http://www.montevideo.gub.uy/aquehorapasa/aquehorapasa.html</a>
Momento de la consulta	Pre-trip, on trip
Información que provee	Dada una parada, el horario de los próximos ómnibus que pasan por esa parada.
Tecnologías	Web móvil
Breve descripción	Se selecciona una parada desde una entrada numérica o desde un mapa y se ve la lista de ómnibus que pasan por la misma.
Ventajas	
Desventajas	No agrega información en tiempo real sobre desvíos o atrasos de cada ómnibus.
Muestra Recorrido	NO
Posición Actual	SI
Info en tiempo real	SI
Accesible en viaje	SI
Time-Table	SI
Frecuencia	NO
Transbordos	NO
Customizable	NO


## Montevideo Bus

	
Nombre sistema	Montevideo Bus
Ciudad	Montevideo, Uruguay
Proveedor	Montevideo Bus, <a href="http://www.montevideobus.com.uy">http://www.montevideobus.com.uy</a>
Momento de la consulta	Pre-trip, on-trip
Información que provee	Recorrido de ómnibus y localización de paradas
Tecnologías	Web, Web móvil
Breve descripción	Información actualizada por los usuarios
Ventajas	
Desventajas	No muestra información relevante a los horarios de pasada de las líneas.
Muestra Recorrido	SI
Posición Actual	SI
Info en tiempo real	NO
Accesible en viaje	SI
Time-Table	NO
Frecuencia	NO
Transbordos	SI
Customizable	NO


	
Nombre sistema	iBus
Ciudad	Montevideo, Uruguay
Proveedor	Cutcsa, Movistar, <a href="http://ibus.com.uy">http://ibus.com.uy</a>
Momento de la consulta	Pre-Trip
Información que provee	Tiempo que falta para los dos siguientes ómnibus de la línea seleccionada.
Tecnologías	SMS, mecanismo basado en ubicación (LBS) mediante antenas de celular.
Breve descripción	Se envía la palabra BUS <Linea> [Parada] a un número de teléfono y se recibe un SMS con la información.
Ventajas	Accesible en todos los momentos del viaje.
Desventajas	Implica un costo monetario al consultante.
Muestra Recorrido	NO
Posición Actual	NO
Info en tiempo real	SI
Accesible en viaje	NO
Time-Table	NO
Frecuencia	SI
Transbordos	NO
Customizable	NO




## Société de transport de Montréal

	
Nombre sistema	Société de transport de Montréal
Ciudad	Montréal, Canadá
Proveedor	<a href="http://www.stm.info/en">http://www.stm.info/en</a>
Momento de la consulta	Pre-trip
Información que provee	Ómnibus, Metro
Tecnologías	Web
Breve descripción	Se elige el origen, el destino y la hora de partida o arribo. El sistema muestra los resultados de diferentes recorridos posibles. Se describe totalmente los transbordos necesarios.
Ventajas	Información muy completa de horarios y duraciones de viaje. Transbordos son elegidos utilizando ómnibus, trenes y metros.
Desventajas	Aunque incluye un lugar donde muestra problemas en las líneas no incluye esa información de atraso en la información del viaje.
Muestra Recorrido	SI
Posición Actual	NO
Info en tiempo real	NO, Disponible a fines del 2014 [1]
Accesible en viaje	NO
Time-Table	SI
Frecuencia	NO
Transbordos	SI
Customizable	NO


## MonTransit (STM, Bixi)

	
Nombre sistema	MonTransit (STM, Bixi)
Ciudad	Montreal, Canadá
Proveedor	MathieuMéa <a href="https://code.google.com/p/montrealtransit-for-android/">https://code.google.com/p/montrealtransit-for-android/</a>
Momento de la consulta	Pre-trip, on-trip
Información que provee	Ómnibus, metro, tren, bicicletas.
Tecnologías	Android, Gps
Breve descripción	Se selecciona una parada, y muestra los próximos arribos de todas las líneas que pasan por ella. Se selecciona una línea, muestra las paradas más cercanas y muestra los arribos de esa línea en esa parada. Se listan los puestos de bicicletas más cercanos con la cantidad de bicis disponibles.
Ventajas	Open Source
Desventajas	
Muestra Recorrido	NO
Posición Actual	NO
Info en tiempo real	NO, STM Montreal lo activará a fines del 2014
Accesible en viaje	SI
Time-Table	SI
Frecuencia	NO
Transbordos	NO
Customizable	SI


## Consorcio Transportes :: Madrid


	
Nombre sistema	Consorcio Transportes :: Madrid
Ciudad	Madrid, España
Proveedor	<a href="http://www.ctm-madrid.es/">http://www.ctm-madrid.es/</a>
Momento de la consulta	Pre-Trip
Información que provee	Recorrido y tiempo de recorrido
Tecnologías	Web
Breve descripción	Se selecciona el origen y el destino, utilizando direcciones o lista de puntos de interés, se selecciona el método de transporte y el sistema muestra las instrucciones de que tomarse y el tiempo
Ventajas	
Desventajas	
Muestra Recorrido	SI
Posición Actual	NO
Info en tiempo real	NO
Accesible en viaje	NO
Time-Table	NO
Frecuencia	SI
Transbordos	NO
Customizable	NO

## Madrid Transportes


	
Nombre sistema	Madrid Transportes
Ciudad	Madrid, España
Proveedor	VallecilloWeb
Momento de la consulta	Pre-trip, on-trip
Información que provee	Recorridos, distancia entre una parada y los próximos ómnibus en tiempo real
Tecnologías	Android, GPS, Redes celulares, Wifi
Breve descripción	Funciona como una aplicación de Android. El sistema provee al usuario de líneas y paradas, para seleccionar, a partir de las cuales calcula distancias y tiempos de espera en tiempo real.
Ventajas	Accesible en cualquier momento
Desventajas	Necesario conocimiento previo de las líneas.
Muestra Recorrido	SI
Posición Actual	NO
Info en tiempo real	SI
Accesible en viaje	SI
Time-Table	NO
Frecuencia	SI
Transbordos	NO
Customizable	NO

## Zaragoza Rutas


	
Nombre sistema	Zaragoza Rutas
Ciudad	Zaragoza, España
Proveedor	Ayuntamiento de Zaragoza mediante <a href="http://www.geoslab.com/es/noticias/noticias/211-appsayto">http://www.geoslab.com/es/noticias/noticias/211-appsayto</a>
Momento de la consulta	Pre-trip, on-trip
Información que provee	Recorridos, distancia entre una parada y los próximos ómnibus en tiempo real
Tecnologías	Android, GPS, Redes celulares, Wifi
Breve descripción	Funciona como una aplicación de Android. El sistema provee al usuario de recorridos y paradas, para seleccionar, a partir de las cuales calcula distancias y tiempos de espera en tiempo real.
Ventajas	Accesible en cualquier momento, provee un visualizador detallado. Incluye estimación tiempo caminando.
Desventajas	
Muestra Recorrido	SI
Posición Actual	SI
Info en tiempo real	SI
Accesible en viaje	SI
Time-Table	SI
Frecuencia	SI
Transbordos	SI
Customizable	NO

	
Nombre sistema	London Transport App
Ciudad	Londres, Inglaterra
Proveedor	LondonNut.com
Momento de la consulta	Pre-trip, on-trip
Información que provee	Vivo Tube Status / tren Actualizaciones (tube.lu) Vivo autobús Estado / Horarios ómnibus (TFL) Vivo metro / tren Hora de salida (TFL) Planee un viaje / ruta (TFL) Llamar a un taxi (Call-A-Cab) Pagar peaje urbano (TFL)
Tecnologías	Android, GPS, Redes celulares, Wifi
Breve descripción	Funciona como una aplicación de Android. Despliega recorridos y estado actual de metros y ómnibus.
Ventajas	Accesible en cualquier momento. Visualizador detallado. No se precisa ningún conocimiento previo sobre las líneas
Desventajas	
Muestra Recorrido	SI
Posición Actual	SI
Info en tiempo real	SI
Accesible en viaje	SI
Time-Table	SI
Frecuencia	SI
Transbordos	SI
Customizable	NO

Live train map for the London Underground


	
Nombre sistema	Live train map for the London Underground, by Matthew Somerville
Ciudad	Londres, Inglaterra
Proveedor	Matthew Somerville, <a href="http://traintimes.org.uk/map/tube/">http://traintimes.org.uk/map/tube/</a>
Momento de la consulta	Pre-trip
Información que provee	Posición en calculada de Metros según horario de salida en tiempo real
Tecnologías	Web, GIS
Breve descripción	Aplicación generada en unas pocas horas usando el API de la TFL en un HackDay. API: <a href="http://www.tfl.gov.uk/businessandpartners/syndication/">http://www.tfl.gov.uk/businessandpartners/syndication/</a>
Ventajas	
Desventajas	Consume muchos recursos.
Muestra Recorrido	SI
Posición Actual	NO
Info en tiempo real	NI
Accesible en viaje	NO
Time-Table	SI
Frecuencia	NO
Transbordos	NO
Customizable	NO

## Google Maps

	
Nombre sistema	Google Maps
Ciudad	New York, USA
Proveedor	Google, <a href="http://maps.google.com">http://maps.google.com</a>
Momento de la consulta	Pre-trip, on-trip
Información que provee	Horario de arribo de metros a una estación dada en tiempo real
Tecnologías	Web, Android, iOS
Breve descripción	Dado un mapa de con las estaciones de metro y las líneas de metro, si se selecciona una de ellas se despliega la información horaria de los próximos arribos.
Ventajas	
Desventajas	
Muestra Recorrido	SI
Posición Actual	SI
Info en tiempo real	SI
Accesible en viaje	SI
Time-Table	SI
Frecuencia	OP
Transbordos	SI
Customizable	SI



## One Bus Away

	
Nombre sistema	One Bus Away Project
Ciudad	Atlanta, New York, Puget Sound, Tampa
Proveedor	<a href="http://onebusaway.org/">http://onebusaway.org/</a>
Momento de la consulta	Pre-trip, on-trip
Información que provee	Horario de arribo de ómnibus a una parada, así como el tiempo de retraso.
Tecnologías	Web, Web Mobile, Android, iOS, Windows Phone
Breve descripción	Se selecciona una parada de un mapa y se muestra la información de las líneas que pasan, sumando el retraso con el tiempo que supuestamente pasarían.
Ventajas	Open Source, múltiples plataformas, interfaz sencilla, información en tiempo real de retrasos.
Desventajas	
Muestra Recorrido	SI
Posición Actual	SI
Info en tiempo real	SI
Accesible en viaje	SI
Time-Table	OP
Frecuencia	OP
Transbordos	SI
Customizable	NO, Solo favoritos



## Apéndice B - Archivos de salida del simulador

En este apéndice se explicarán los nuevos archivos de salida incorporados al simulador

### TablasHorarios\_nn.txt

Al inicializar el simulador, este agenda las salidas de las distintas líneas según las frecuencias de las mismas. A partir de esta planificación el sistema genera las tablas de horarios estáticas de las líneas. A medida que los ómnibus cubren los recorridos planificados de estas líneas, con sus adelantos y retrasos temporales, el sistema construye la tabla de horarios dinámica del sistema.

Una vez que el tiempo de simulación del experimento nn culmine, el sistema genera el archivo “TablasHorarios\_nn.txt”, en donde imprime las dos tablas de horarios generadas.

El sistema imprime las tablas por líneas, para cada una de estas imprime el número de línea, la cantidad de paradas del recorrido, y la tabla. La tabla tendrá las siguientes columnas, en orden: la salida representada; el identificador numérico del ómnibus que fue asignado a la salida; y el tiempo planificado y real de llegada para cada parada, ordenadas por el recorrido.

Ejemplo salida:

```
LINEA: 1
Cant paradas: 18
SAL   BUS                187|                186|                185|
-----
[ 0][ 1]          0.00,  17.38|          112.62,  80.86|          180.60,  119.17|
[ 1][ 16]       1800.00, 1873.73|       1912.62, 2142.99|       1980.60, 2305.51|
[ 2][ 1]       3600.00, 3649.81|       3712.62, 3732.41|       3780.60, 3733.10|
```

El primer renglón “LINEA:” indica el número de línea, luego “Cant paradas:” cuantas paradas tiene el recorrido.

La tercera línea tiene los cabezales de la tabla de horario. “SAL” es el nro. de salida y “BUS” el identificador del ómnibus que realiza dicha salida. Seguido de los identificadores de las paradas del recorrido, debajo de los cuales se desplegará la hora de pasada por la parada calculada según frecuencia y la real.

### Bitacoras\_nn.txt

En el transcurso del viaje del pasajero el mismo debe tomar decisiones según sus posibilidades en el sistema de transporte. En este archivo se guardan, para cada pasajero, todas las evaluaciones y acciones tomadas en la realización de su viaje.

De éstas posibilidades el archivo registra: línea, salida asociada a la línea, parada origen donde el pasajero se embarcaría, parada destino, tiempo de caminata hasta la parada origen, tiempo estimado de llegada de pasajero a parada, arribo del ómnibus a parada origen, y arribo del ómnibus a parada destino.

El archivo indica la opción por la que opta el pasajero, así como los tiempos reales de creación, salida de la casa, llegada a parada origen, llegada a parada destino, y llegada a centroide destino.

Ejemplo salida:

```
*****
Pasajero ID = 291
Centroide origen:          66
Centroide destino:        59
*****

Hora de creacion:          682.76
Demora Salida de casa:    0.00
Hora salida de casa:      682.76
Tiempo caminata a pOrig : 482.94
Hora arribo a pOrigen :   1165.70
idParada pOrigen:         187

Hora llegada bus pOrigen: 1478.83
Tiempo de espera en para: 313.13
Hora subida bus:          1478.83
idBus utilizado:          15
idLinea utilizada:        11
idSalida utilizada:       1

hora bajada del bus:      1997.31
idParada pDestino:        225
Tiempo caminata c.dest:   199.26
hora llegada a c.destino: 2196.57
tiempo total de viaje:    1513.81

idLinea elegida en orig:  11
Tiempo estimado en orig:  2154.12

Opciones posibles en origen:
>> {l: 12, s: 1, o: 147, d: 224, hSim: 682.76, tCam: 394.50, hPar: 1077.26,
hArribBus: 3863.04, hDest: 7031.28}
>> {l: 4, s: 13, o: 187, d: 225, hSim: 682.76, tCam: 482.94, hPar: 1165.70,
hArribBus: 2124.54, hDest: 3078.66}
>> {l: 6, s: 1, o: 187, d: 225, hSim: 682.76, tCam: 482.94, hPar: 1165.70,
hArribBus: 2183.82, hDest: 3137.94}
>> {l: 10, s: 1, o: 187, d: 225, hSim: 682.76, tCam: 482.94, hPar: 1165.70,
hArribBus: 2183.82, hDest: 3137.94}
>> {l: 11, s: 1, o: 187, d: 225, hSim: 682.76, tCam: 482.94, hPar: 1165.70,
hArribBus: 1200.00, hDest: 2154.12}
```

```

>> {l: 12, s: 1, o: 148, d: 224, hSim: 682.76, tCam: 737.40, hPar: 1420.16,
hArribBus: 3944.64, hDest: 7031.28}

idLinea elegida en dest:      11
Cant buses deajo pasar:      0
Tiempo estimado en parada:    2716.63

Opciones posibles en parada :
>> {l: 11, s: 2, o: 187, d: 225, hSim: 1478.83, tCam: 0.00, hPar: 1478.83,
hArribBus: 2400.00, hDest: 3354.12}
*****

```

Los primeros datos arrojados son las marcas de tiempo y elección efectiva por tramo de viaje. En el primer párrafo los datos desde el origen, en el segundo en parada, en el tercero en destino.

Luego, se identifican dos listados, “Opciones posibles en origen” y “Opciones posibles en parada”, el primero de ellos refiere a todas las opciones que maneja el pasajero al realizar su evaluación cuando es creado y se encuentra en origen, el siguiente son las opciones que evalúa en la parada al llegar cada ómnibus.

El formato de cada opción manejada se muestra con un “>>”, continuado de la siguiente forma

- l : representa el id de la línea a evaluar
- s: número de salida de la línea
- o: identificador de la parada origen
- d: identificador de la parada destino
- hSim: marca de tiempo del simulador en la que realiza la evaluación
- tCam: tiempo de caminata entre origen y parada
- hPar: marca de tiempo del simulador en la que el pasajero arriba a parada
- hArribBus: marca de tiempo del simulador en la que el ómnibus arriba a parada origen
- hDest: marca de tiempo del simulador en la que el ómnibus arriba a parada destino

## ViajePasajeros\_nn.txt

Una vez que los pasajeros finalizan su viaje, en el centroide destino, registran el tiempo total en un histograma. En este archivo se muestra el histograma para la ejecución nn. El formato del mismo es propio de la biblioteca EOSimulator

El promedio de los mean de estos histogramas se utiliza como el indicador principal de comparación entre los distintos modelos.

Ejemplo salida:

```
Tiempos de viaje de los pasajeros - Observation Histogram
procesed = 4319
mean = 2711.27    variance = 1.25253e+006    sd = 1119.16
minX = 726.6     maxX = 8274.03
minY = 1         maxY = 27
```

726.6 **	1
734.147	0
741.695	0
749.242 ****	2
756.79	0
764.337	0
771.885 **	1
...	
...	

## Apéndice C - Descripción caso de Rivera

Los datos empleados como entrada para el simulador surgen de la información relevada del sistema de transporte público de la ciudad de Rivera en el 2003/2004.

Se relevaron un conjunto de 13 líneas que le prestan servicios a una población de 65.000 habitantes, transportando un promedio de 7000 pasajeros todos los días.

Se cuenta con ambos tipos de recorrido, 11 de ida y vuelta y 2 circulares.

Hay 2 recorridos de 20 minutos, 6 de 30 y 5 de 60 minutos.

El plano de la ciudad es:



Rivera se divide en un conjunto de 83 zonas cuyos centroides son definidos de la siguiente forma:



En [22] se explican más en detalle estos centroides.



## Apéndice D - Manual de usuario

A partir de la solución compilada de PublicTransport se puede ejecutar la misma por línea de comando, especificando en la pasada por parámetros los distintos tipos de experimentos que desean ejecutarse.

```
> PublicTransport.exe -h
Uso: PublicTransport.exe grafo solucion demanda lineas [tiempo]

Argumentos:
grafo          Archivo grafo.txt que se encuentra en manipulacion
solucion       Archivo .solucion generado por manipulacion
demanda        Archivo de demanda generado por construccion
lineas         Archivo de lineas para recorridos
tiempo         Segundos de simulacion (por defecto es 21600 = 6hs)

Flags:
-d/--default   Permite ignorar todos los argumentos y ejecutar con valores por
defecto
-e/--espera    Habilita espera de Buses en parada (Solo para calcular Z2)
-f/--sdlfast   Habilita la salida visual de la simulacion a maxima velocidad
-l/--log       Habilita la generacion de un log para el visor
-n/--distribucion Distribucion arribo bus nodo [0:Normal], 1:NegExp      Distribu
cion arribo bus nodo [0:Normal], 1:NegExp
-r/--repeticiones Cantidad de experimentos (por defecto es 1)  Cantidad de expe
rimentos (por defecto es 1)
-s/--sdl       Habilita la salida visual de la simulacion
-x/--estrategia 0:Oraculo, 1:Original, 2:transbordo, 3:InfoParadas, 4:Pre-trip,
5:LineaCandidata, 6:ThorarioEstatica, 7:Frecuencia [6]  0:Oraculo, 1:Original, 2
:transbordo, 3:InfoParadas, 4:Pre-trip, 5:LineaCandidata, 6:ThorarioEstatica, 7:F
recuencia [6]
```

Además, se construyó un script que facilite la ejecución de todos los modelos consecutivamente, para facilitar la obtención de datos ejecutando una a una cada modelo. Este script dejará los archivos salientes de cada modelo en carpetas separadas.

```
@echo off
setlocal EnableDelayedExpansion
SET BIN=!CD!\Debug\PublicTransport.exe -d -r 100 -n 0
SET ENTRADAPATH=!CD!\entrada

SET BASEPATH=!CD!\expes
mkdir !BASEPATH!

SET MYDATE=!DATE:~6,4!-!DATE:~3,2!-!DATE:~0,2!

SET RUNPATH=!BASEPATH!\experimento-!MYDATE!
SET RETURNPATH=!CD!

echo RUNPATH=!RUNPATH!
mkdir !RUNPATH!

REM set estrategias=0,3,4,5,6,7
set estrategias=5,6,7
```

```

for %%i in (!estrategias!) do (
    echo .
    echo #####
    echo # corriendo estrategia %%i #
    echo #####
    echo .

    SET EXP_PATH=!RUNPATH!\%%i
    echo !EXP_PATH!
    mkdir !EXP_PATH!
    mkdir !EXP_PATH!\entrada
    xcopy !ENTRADAPATH! !EXP_PATH!\entrada /s /e
    mkdir !EXP_PATH!\reportes
    mkdir !EXP_PATH!\histogramas
    cd !EXP_PATH!
    %BIN% -x %%i
)
cd !RETURNPATH!
endlocal

```