

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Posgrados**

**Un modelo de simulación de operación para el sistema de  
transporte urbano**

**Ecovía-Quito**

**Luis Eduardo Castro Abril**

**Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de  
Magíster en Matemática Aplicada**

**Quito, diciembre de 2011**

# UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Posgrados

## HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Un modelo de simulación de operación para el sistema de transporte urbano

Ecovía-Quito

**Luis Eduardo Castro Abril**

Carlos Jiménez, Ph. D

Director de la Maestría en Matemáticas Aplicadas y

Director de la Tesis

---

Daniel Merchán, MS

Miembro del Comité de Tesis

---

Carlos Jiménez, Ph. D

Miembro del Comité de Tesis

---

Fernando Romo, MS

Decano del Colegio Politécnico

---

Victor Viteri Breedy, Ph.D

Decano del Colegio de Posgrados

---

Quito, diciembre de 2011

Derechos de Autor

Luis Castro Abril

Diciembre de 2011

*A mi esposa (Mi Day), la luz que me inspira y motiva a afrontar con esperanza la vida*

*A mis padres y hermano, (Luis, Bertha y Miguel) pilares fundamentales de mi vida y  
soporte de estos mis pequeños y primeros pasos*

*A mi director y maestro (Carlos), amigo que con templanza continua en el trabajo de  
romper mis esquemas y taras mentales*

*Agradecimiento al Ing. Carlos Paéz, Secretario de Movilidad del DMQ por su apertura  
y acceso a los datos del sistema ECOVIA.*

*Junto a él, un agradecimiento sincero al gerente de la empresa ECOVIA y al apoyo  
brindado por el personal del sistema.*

# **Un modelo de simulación de operación para el sistema de transporte urbano**

## **Ecovía-Quito**

### Abstract

El presente trabajo recoge un esquema de simulación de operación para el sistema de transporte urbano de la ciudad de Quito, Ecovía. Se recoge la dinámica de operación del sistema durante el día de la semana y horario de mayor demanda (Miércoles - 17h00 a 19h00). Dicha dinámica se resume en la construcción de la matriz Origen-Destino, y su uso para un esquema de simulación computacional de operación. Se presenta el estado de la solución de operación actual del sistema en términos de niveles de ocupación, nivel de atención a la demanda y tiempos de espera de los usuarios. En base a simulación, se exploran mejoras heurísticas a la solución actual, logrando una reducción en 4 unidades respecto a la solución actual del operador (reducción directa asociada al costo de operación), manteniendo estadísticamente inalterado el nivel promedio de servicio ; pero, en detrimento de ligeros incrementos en los tiempos de espera máximos de los usuarios .

El documento está organizado bajo el siguiente esquema: (1) Introducción recoge la motivación del trabajo y el contexto del sistema de transporte Ecovía, (2) muestra el estado del arte en cuanto a modelos de transporte público masivo, (3) explica de manera sucinta la dinámica del sistema Ecovía y el trabajo de reconstrucción de la matriz Origen-Destino para el horario de simulación, (4) presenta la metodología, supuestos y esquema utilizado para la construcción del simulador de operación del sistema; finalmente, (5) muestra los resultados y mejoras propuestas basadas en un esquema heurístico de simulación.

# **A operational simulation model for the urban transportation system**

## **Ecovía-Quito**

### Abstract

The present paper exposes an operational simulation model for the public transportation system Ecovia of the city of Quito. The dynamics of the system are studied using the day of the week with the highest user's demanda (Wednesday - 17h00 to 19h00). The data is collected in a origin-destination matrix, later use in the operational simulation. The actual solution is pictured through simulation analyzing the actual level of capacity of the net, levels of demand covered and the travel and waiting time of users. Using an heuristical procedure, a new solution is found for the net, improving the actual average capacity per bus and the demand coverage; just incrementing the maximum waiting times at the stops by less than a second.

The following work is organized as: (1)Introduction presents the motivation for the work and the context of the Ecovia system, (2) shows the state of the art on public mass transportation models, (3) explains the dynamics of the system and the construction of the origin-destination matrix,(4) develops the methodology implemented for the construction of the operational simulator, and (5) depicts the results and the improvement proposals based on an heuristic eschema for simulation.

# Índice

<b>I</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1	Motivación y Relevancia	1
<b>II</b>	<b>REVISIÓN DE LA LITERATURA</b>	<b>2</b>
2	Estado del Arte en Modelos de Transporte Público Masivo	2
<b>III</b>	<b>SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO ECOVIA</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>ECOVIA</b>	<b>6</b>
3.1	Construcción de la Matriz Origen Destino . . . . .	7
<b>IV</b>	<b>CONSTRUCCIÓN SIMULADOR DE OPERACIONES</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Esquema y objetivo de simulación</b>	<b>11</b>
4.1	Supuestos . . . . .	11
4.2	Estructura y Pseudocódigo . . . . .	12
<b>V</b>	<b>EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA Y RESULTADOS</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Preámbulo</b>	<b>16</b>
5.1	Resultados en el Nivel de Servicio . . . . .	17
5.2	Resultados asociados al Costo de Operación . . . . .	30
5.3	Conclusiones y Propuesta . . . . .	35
<b>VI</b>	<b>Referencias</b>	<b>39</b>



## Índice de figuras

1	Mapa del Sistema de Transporte Ecovia . . . . .	7
2	Esquema de recolección de la información - ECOVIA . . . . .	8
3	Esquema de simulación- ECOVIA . . . . .	13
4	Demanda del Sistema Ecovia . . . . .	18
5	Distribución de los tiempos de espera máximos del sistema Ecovia - Solución del Operador . . . . .	23
6	Distribución de los tiempos de espera máximos del sistema Ecovia - Solución Sim3 . . . . .	25
7	Distribución de los tiempos de viaje del sistema Ecovia - Sol Operador . .	27
8	Distribución del nivel de cobertura del sistema Ecovia - Sol Operador . .	29
9	Distribución de la capacidad utilizada de los buses del sistema Ecovia - Sol Operador . . . . .	32
10	Distribución de la capacidad utilizada de los buses del sistema Ecovia - Solución Sim3 . . . . .	34
11	Distribución de las variables de solución de mejora 24 Buses frente a la solución del operador. . . . .	38

## Índice de cuadros

1	Recolección de la literatura disponible sobre asignación de flota y diseño de agenda . . . . .	3
2	Recolección de la literatura disponible sobre asignación de flota y diseño de agenda . . . . .	4
3	Número Usuarios Totales en el Horario 16h00 a 17h00 . . . . .	9
4	Algoritmo simulación ECOVIA - Matriz de Usuarios por origen y Destino	13
5	Algoritmo simulación ECOVIA - Matriz de agenda de buses . . . . .	14
6	Algoritmo simulación ECOVIA - Interacción Bus -Usuario . . . . .	14
7	Variables de resultados de la simulación de operaciones - ECOVIA . . . .	15
8	Escenarios de simulación - ECOVIA . . . . .	17
9	Estadígrafos de Resumen de las Variables asociadas al nivel de Servicio - Horario Tipo A . . . . .	19
10	Estadígrafos de Resumen de las Variables asociadas al nivel de Servicio - Horario Tipo B . . . . .	21
11	Resumen variables asociadas al costo de operación . . . . .	30
12	Algoritmo heurístico de búsqueda de mejora en los niveles promedio de solución . . . . .	36
13	Estadígrafos de Resumen - Solución de mejora 24 Buses . . . . .	36

## Parte I

# INTRODUCCIÓN

## 1 Motivación y Relevancia

Uno de los problemas actuales de las grandes metrópolis constituye los sistemas de transporte público. Alrededor de estos se desarrollan las actividades productivas y sociales de las ciudades, por ende convirtiéndose en un eje central en la vida del ciudadano urbano. Dentro de este contexto, la ciudad de Quito por su singularidad geográfica - alargada con más de 12 kilómetros de extensión en largo- presenta un reto para la planificación de transportes públicos. Actualmente, la ciudad posee tres sistemas de transporte masivo en operación, además de decenas de líneas de buses privadas con rutas específicas. La característica común: una desarticulación en la coordinación de operaciones, lo cual da señales de existencia de suboptimalidad en los niveles de flota, agenda, nivel de servicio y costos.

El presente trabajo plantea abordar la problemática del transporte público, centrándose en la dinámica de operación del sistema Ecovía, en el tramo de paradas comprendido entre la Río Coca y el playon de la Marín. Se plantea explorar la dinámica de operación actual del sistema mediante la construcción de un simulador de operaciones que permita conocer las condiciones actuales del nivel de servicio y operaciones. El conocimiento y estudio de la red busca concluir en el planteamiento de mejoras de solución para el ruteo de buses.

## Parte II

# REVISIÓN DE LA LITERATURA

## 2 Estado del Arte en Modelos de Transporte Público Masivo

En el diseño de los problemas de transporte público masivo, las preguntas de planificación parten con el diseño de la red y concluyen en la asignación de tareas a los operadores de la misma. El diseño de un transporte público comprende en grandes rasgos 4 pasos:

1. Diseño del trazado del sistema: tomar el cuenta la ruta por la cual opera un sistema de transporte buscando maximizar la cobertura de la red en el territorio.
2. Asignación de buses a recorridos: determinar dentro de un trazado que recorrido debe ser cubierto por las unidades, y las posibles interacciones y mezclas entre las distintas rutas de un sistema de transporte.
3. Determinación de tamaño de flota y frecuencia: definir el tamaño de la flota, generando tablas de operación para salida y llegada de buses por ruta. El objetivo es la búsqueda del menor número de unidades posibles que cubran mayoritariamente a la totalidad de la demanda que posee la red.
4. Asignación de choferes a las unidades: determinar las unidades y número de unidades a ser conducidas por un chofer en un día de operaciones.

Nótese que las variables claves alrededor del planeación, diseño e implementación de operaciones de una red de transporte masivos son el costo de operación y los niveles de servicio de los usuarios. A lo largo del diseño, estas siempre están presentes, y son el fruto de la interacción de la red. El presente trabajo centra su foco de atención en el paso tres, la determinación del tamaño de flota y frecuencia.

Dentro de la determinación del tamaño de la flota y su agenda de salida, se encuentra una basta literatura. Las soluciones propuestas varían desde modelos matemáticos

determinísticos que ven en la asignación de flota aun problema de simplemente cobertura de la demanda en base a la capacidad de los buses; hasta planteamientos que ven al sistema de transporte como un sistema de agentes dinámicos donde reglas de comportamiento de usuarios y operadores de buses dan como resultado los niveles de servicio y costos del sistema. A continuación se presenta una basta recolección de la literatura, ampliando los esfuerzos de recolección de Guihaire y Kao[2008].

Table 1: Recolección de la literatura disponible sobre asignación de flota y diseño de agenda

Año	Autor	Problema	Método	F.Objetivo
1925	Patz	DA	HD	número asientos vacíos
1967	Lampkin	DAF	HD	número de pasajeros directos, tiempo total de viaje
1972/1980	Salzborn	DAF	MD	tamaño de la flota y tiempos de espera del pasajero
1974	Silman	DAF	HD	tamaño de la flota, tiempo de viaje, nivel de sobreocupación
1976	Rapp	DA	HD	optimización en transferencias
1979	Bell	DAF	HD	tiempo viaje total de los pasajeros
1979/1981	Hasselstrom	DAF	HD	número de transferencias, número de pasajeros
1980	Scheele	DA	MD	tiempo de viaje
1982	Han	DAF	HD	minimizar el nivel máximo de ocupación en los puntos de mayor carga
1985	Koutsopolus	DA	MD	tiempos de espera, costo operador, sobrecarga
1986	Ceder	DAF	HD	exceso del tiempo de viaje, costo
1987	Klem	DA	H	sincronización en transferencia
1988	Van Nes	DAF	M	cobertura de la demanda, número de viajes directos
1992	Bookbinder	DF	O	tiempos de espera
1995/7/8	Chakroborty	DF	BV	tiempo de transferencia
1998	Bussiek	DAF	MD	número de pasajeros totales, costo de operación
1998	Carriese	DAF	HD	tiempos de espera de usuarios, costo
1999	Dhingra	DA	E	tiempo de viaje del vehículo, tiempo de caminata de usuarios
2001	Ceder	DA	H	número de arribos simultáneos
2002	Bielli	DAF	E	tiempo de viaje, tamaño de la flota, operación de red
2002	Yan	DA	M	ingresos
2003/4/6	Zhao	DAF	BV	número de transferencias, ruta de servicio, cobertura
2004	Castelli	DA	H	tiempo de espera de transferencias
2005	Park	DAF	O	tamaño de flota, tiempo de viaje, tiempos de espera
2005	Mes	DAF	H	costo de operación
2005	Mauttone	DAF	H	costo de operación, tiempos de espera y cobertura
2007	Meignan	-	Ag	Simulación de agentes de la red de transporte
2009	Torres	DAF	BV	costo de operación

Problema: DA - Determinístico de asignación, DAF - Determinístico de asignación y flota, DF - Determinístico de flota,

Método: H - heurístico, M - matemático, MD - matemático determinístico, HD - heurístico determinístico, BV - búsqueda vecino más cercano, E - algoritmo genético, Ag -

Agente computacional, O - Otro

Table 2: Recolección de la literatura disponible sobre asignación de flota y diseño de agenda

Año	Autor	Restricciones	Aplicación
1925	Patz	capacidad del bus, demanda	ejemplo hipotético
1967	Lampkin	tamaño de la flota	red de buses de Gran Bretaña
1972/1980	Salzborn	-	líneas de alimentación de buses
1974	Silman	presupuesto	Haifa
1976	Rapp	optimización de transfer	-
1979	Bell	presupuesto	replanificación rutas Francesas
1979/1981	Hasselstrom	presupuesto	software
1980	Scheele	capacidad, tamaño de la flota	-
1982	Han	tamaño de la flota, capacidad, presupuesto	-
1985	Koutsopulus	tamaño de la flota, carga por ruta	asignación y mejora de rutas
1986	Ceder	frecuencia mínima, tamaño de la ruta, capacidad	proceso transporte público
1987	Klem	-	modelo de diseño de agendas
1988	Van Nes	tamaño de la flota	ejemplo simple
1992	Bookbinder	rutas de la red, capacidad	teórico
1995/7/8	Chakroborty	líneas y frecuencias	casos áreas urbanas
1998	Bussiek	nivel de servicio, calidad y recursos	trenes
1998	Carriese	satisfacción de la demanda, tamaño de la flota, número de transfers	área urbana de Roma
1999	Dhingra	tamaño de la flota, longitud de las rutas	ejemplo simple
2001	Ceder	capacidad de la ruta	aplicación teórica
2002	Bielli	líneas predefinidas	Parma
2002	Yan	tamaño de la flota, nivel de servicio requerido	Taiwan
2003/4/6	Zhao	líneas históricas, número de rutas	software
2004	Castelli	número de líneas, tráfico en la red	ejemplo aleatorio generado
2005	Park	línea, arribo estocástico de las unidades	caso urbano de estudio
2005	Mes	nivel de cobertura de la demanda	ejemplo data simulada
2005	Mauttone	-	Rivera
2007	Meignan	-	Computacional
2009	Torres	nivel de demanda	Trolebus Quito

La literatura muestra la división entre los modelos considerados como matemáticos puros, los modelos de búsqueda del vecino más cercano, los modelos heurísticos basados en ideas de agentes y simulación y modelos de algoritmos de resolución evolucionaria. El único esfuerzo puntual para el caso ecuatoriano, en específico de

Quito, es el modelo de Torres(2009) en el cual se resuelve un problema de asignación de agenda y flota mediante algoritmo de búsqueda de vecino más cercano e ideas de arboles máximos de expansión.

En cuanto a los modelos de simulación y agentes, la literatura muestra pocos esfuerzos en reconstruir las dinámicas del transporte mediante este proceso. Sin embargo, este rubro es el de mayor elección cuando se incorpora el criterio de optimización o mejoras multiobjetivo. El documento de Mauttone recoge la noción de optimización multiobjetivo y la búsqueda de soluciones factibles a partir de iteraciones heurísticas mediante simulación - resolviendo en un caso de aplicación un problema de optimización combinatoria NP complejo.

## Parte III

# SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO ECOVIA

## 3 ECOVIA

El sistema de transporte ECOVIA nace como parte del plan de movilidad maestro diseñado durante la alcaldía de Econ. Jamil Mahuad, como uno de los componentes del sistema de transporte rápido de la ciudad de Quito. Insertado en este esquema, en 1998 la iniciativa arranca su construcción bajo la venia del alcalde Econ. Roque Sevilla. En 2001, el sistema inicia sus operaciones en su trayecto principal, Río Coca hacia el playond e la Marín, recorriendo la ciudad a lo largo de la avenida 6 de diciembre.

Actualmente, el sistema se compone de tres tramos. La troncal principal comprendida entre las avenidas Río Coca, transitando toda la avenida 6 de diciembre, hasta terminar en el playón de la Marín. Un segundo tramos comprendido entre el playón, continuando a lo largo de la avenida Napo, hasta concluir en el sector de Chimbacalle. Finalmente, un tercer tramo de operación entre la zona de Chimbacalle y la estación Morán Valverde (sector Quitumbe), operando mayoritariamente sobre la avenida Maldonado. El presente análisis centra su foco de atención en el primer tramo.

Para el trayecto Río Coca-Marín (RCM), la longitud de operación de la ruta es de 9.5km. En este trayecto, se ubican 19 paradas, 17 de las cuales son intermedias y dos de transferencia. El diseño de distancia entre paradas obedece a una lógica simétrica de construcción, mas no a un sentido de optimización de captura de demandas<sup>1</sup> debido a esto la mayoría de paradas se encuentran a una distancia casi proporcional de 0.5 km entre cada una.

---

<sup>1</sup>En el sentido expresado en el marco teórico, en el cual el primer punto de diseño de una red es definir el trazado en el mapa topológico en función de cubrir la mayor demanda posible localizada en la zona de influencia de la parada.



Figure 1: Mapa del Sistema de Transporte Ecovia



El sistema ECOVIA opera bajo la modalidad de transporte masivo de carril exclusivo. Su flota consta de 50 unidades, cada una con una capacidad máxima de 200 pasajeros. Se consideran para el operador del sistema horas pico de uso a los segmentos de horarios de la mañana entre las 7h00 y las 9h00, y la tarde entre las 16h00 a 19h00 horas. Para estos segmentos, el diseño de ruteo de vehículos está implementado con 29 buses por hora, saliendo cada uno de estos en intervalos de 2 y 3 minutos, conforme el diseño de agenda del operador.

En base a los datos del operador, en 2010 el sistema transportó cerca de 23.087 millones de pasajeros, con un promedio mensual de transporte de 1.923 millones de usuarios. La demanda diaria en promedio fue de 72,000 usuarios; sin embargo, en los días de mayor uso (lunes, miércoles y viernes) el promedio de usuarios se situó en los 100,000 pasajeros. En el año 2010, según el operador del sistema, la crecida en la demanda se debe a la inclusión y operación total del tramo 2 y 3 en la red ECOVIA. En 2011, los niveles de operación hasta marzo registraban en promedio 110,000 usuarios para los días de mayor demanda.

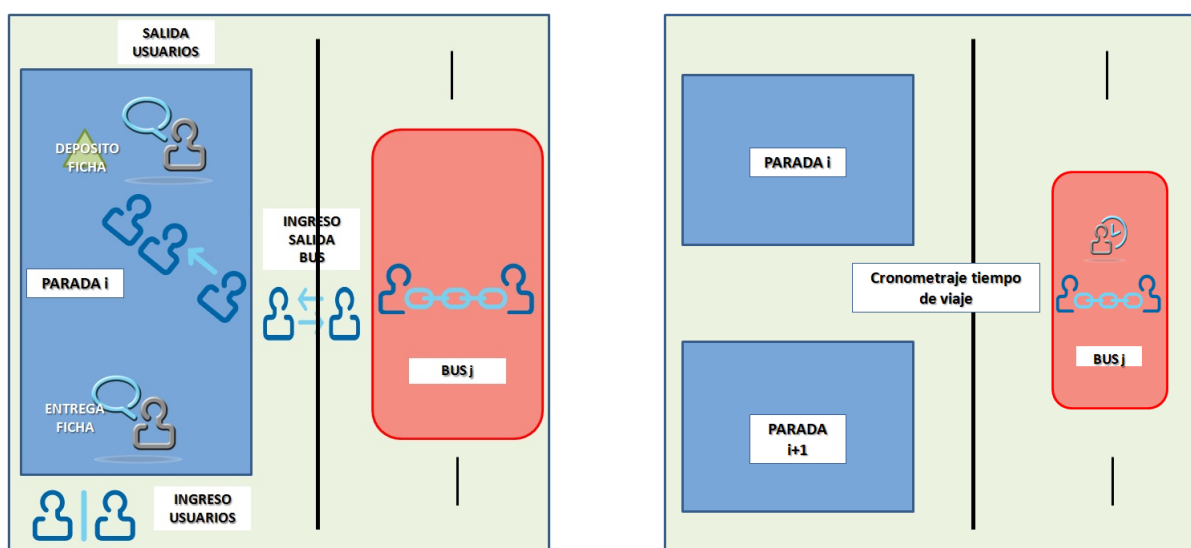
### 3.1 Construcción de la Matriz Origen Destino

Los datos actuales que posee la red ECOVIA se centran en el número de usuarios que ocupan el sistema, esta información es recopilada en base a la recaudación diaria por parada. Lastimosamente, esta data permite tan solo conocer el flujo de entrada en

el sistema. El operador como planificador de la red de transporte, debería conocer en simultáneo los datos de origen (conocidos) y destino de sus usuarios.

El primer paso en el análisis de la dinámica de la red ECOVIA es la obtención de una matriz Origen-Destino que permita conocer los flujos internos del sistema. Para este cometido se realizó una encuesta al estilo de barrido de información, a todos los usuarios que se encontraban en el sistema el día miércoles 6 de abril de 2011. Se detalla a continuación de manera resumida los pasos de recolección de la información y operativo de campo.

Figure 2: Esquema de recolección de la información - ECOVIA



En el día de recolección de la data, la operación inició a las 6h00 y finalizó a las 21h00. En cada parada dos encuestadores entregaron y recolectaron fichas de identificación de parada a los usuarios. La idea general fue entregar fichas codificadas con una letra particular y un horario puntual a cada usuario, según su parada de origen. En el momento de desembarque, se solicitaba a los usuarios que entreguen o depositen las fichas en las urnas ubicadas al final de cada parada. A la par, la operación fue apoyada con anuncios continuos a los usuarios sobre la encuesta, tanto en buses como estaciones. Junto con esta recolección de datos, se procedió a levantar al menos 5 tiempos de viaje completo por horario, por parada. Para estos casos, un encuestador abordaba una unidad en el sentido Norte-Sur y en cada parada registraba el tiempo en minutos-segundos de arribo a la misma. Este trabajo fue complementado, con un barrido de tiempos de espera en el día de operación y dos miércoles subsiguientes -en

Table 3: Número Usuarios Totales en el Horario 16h00 a 17h00

Horario	Usuarios
16 a 17 horas	4341
17 a 18 horas	12662
18 a 19 horas	13747
Total	30751

8 de las principales paradas del sistema. Adicionalmente, se cronometró el tiempo de viaje sin parar (en vehículo privado ) a lo largo de la red.

El operativo fue diseñado para una entrega máxima de 130,000 fichas, entregando una totalidad cercana a las 105,000. En las dos primeras horas de operación se sufrió de leves descordinaciones sumado esto a la desinformación de los usuarios del sistema. El problema de mayor frecuencia fue la no entrega o deterioro de la ficha por parte de los usuarios. En el conteo rápido del número de fichas recolectadas, se estimó este total en 94,521.

A partir de la clasificación y conteo de las fichas se procedió a estimar las proporciones de usuarios que bajaban en la parada j provinientes de la parada i, diferenciando en cada caso para los flujos provinientes del norte y sur, para cada uno de los horarios. Una primera síntesis necesaria para efectos de conteo fue el resumir los dos andenes disponibles en la Marín en uno solo. Una vez obtenida la matriz de proporciones de cada horario, se estimó la proporción total de participación de los horarios en base al porcentaje que reflejaba cada uno en función del total de fichas contadas/recolectadas. En base a los datos reales de usuarios ingresados al sistema el día miércoles 6 de abril de 2011 se procedió a distribuir el número de usuarios entre los horarios y dentro de ellos entre las paradas de origen, en base a las proporciones estimadas de la encuesta origen destino. Este proceso de procesamiento y estimación permitió la construcción de las matrices Origen-Destino (OD) para los horarios de mayor frecuencia del ciclo de la tarde<sup>2</sup>.

La matriz origen destino constituye el pilar fundamental en el esquema de análisis

---

<sup>2</sup>Se opto por este proceso debido al bajo presupuesto en levantamiento de datos, por lo que se volvió intensivo en mano de obra y trabajo. Alternativamente, el actual uso de tecnologías celulares/móviles se presenta como una alternativa viable para el levantamiento de matrices OD, tan solo en base a conteo del movimiento de los usuarios en función de las repetidoras de señal ubicadas a lo largo de la ciudad (con frecuencia de hasta cada 100m). A la vez, sistemas de posicionamiento global puedan ayudar a capturar de una manera total y más eficiente matriz OD para este sistema u otros, en general de transporte.

y simulación que se propone en el siguiente capítulo para estudiar la dinámica actual y posibles mejoras al sistema ECOVIA.

## Parte IV

# CONSTRUCCIÓN SIMULADOR DE OPERACIONES

## 4 Esquema y objetivo de simulación

La simulación de operación del sistema Ecovía requiere el juntar los resultados de la matriz OD con la identificación de la dinámica y comportamiento de los actores involucrados en la red. En el presente capítulo se detallan los supuestos, reglas e interacciones entre los usuarios del sistema (demanda) y los buses de la red (operador). Se estudia este comportamiento mediante simulación, a fin de recuperar las principales variables de la red como usuarios atendidos, los tiempos de espera y viaje, los requerimientos de flota y capacidad utilizada de los buses durante su operación.

### 4.1 Supuestos

EL modelo de simulación pretende modelar por horas, la dinámica de interacción de los usuarios y buses en la red ECOVIA. A continuación se presentan los supuestos de comportamiento de cada agente.

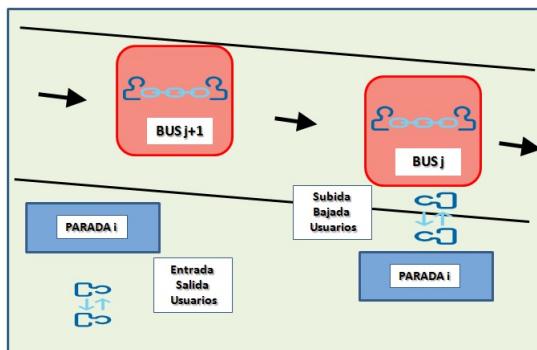
- Agente bus
  - Posea una capacidad máxima de 200 pasajeros, sin embargo, se considera solamente el llenarlo hasta el 90% de su capacidad.
  - Su tiempo de viaje más espera (subir y bajar de pasajeros) entre paradas se distribuye uniformemente entre  $[1, 3]$  minutos
  - No puede arrebasar a otras unidades en el trayecto
  - Transporta solamente a los pasajeros que se encuentran en la parada en el momento exacto de arribo del bus
  
- Agente usuario

- Su flujo de entrada se encuentra determinado por la matriz OD, siguiendo la parada  $i$  un proceo de Poisson por minuto con  $\lambda_i = \frac{\text{Pasajeros}_{i,j}}{60}$ . Es decir, un promedio por minuto en función de los totales recuperados de operación mediante OD.
- La entrada de un pasajero en la parada  $i$  es independiente la entrada del subisguiente en la misma parada.
- Un pasajero solo es capaz de subirse en un bus si se encuentra en la paradas hasta justo el momento exacto de arribo de la unidad.
- Si un bus esta lleno, los usuarios no suben en él y esperan su oportunidad de subida en el siguiente.
- Si el número de usuarios que esperan un bus en la parada  $i$  rebasa la capacidad libre del bus en esa parada, los usuarios se forman en fila según su destino, y se escoge aletoriamente entre ellos hasta llenar el bus.
- Una vez en el bus, el usuario abandona el sistema solamente en su parada de destino y no retorna a él.

## 4.2 Estructura y Pseducódigo

La estructura actual de la red ECOVIA, hace que la operación sobre la misma sea de doble sentido, es decir operado en la dirección norte-sur y en simultáneo en la sur-norte. Sin embargo, gracias a la simetría de la red, y el poseer las paradas en ambos sentidos un solo lugar físico, es posible compactar la red en un solo sentido, y simular la operación del sistema solamente para un flujo unidireccional. A esto se suma el tema que en la parada final del trayecto norte-sur, la Marín, el bus tan solo da media vuelta y retoma la operación en el semtido sur-norte. En base a esta idea, la simulación del sistema ECOVIA se basa en la construcción de una hora de operación, simulación de manera discreta minuto a minuto el recorrido de los buses y entrada de usuarios a lo largo de las 19 paradas en sentido unidireccional.

Figure 3: Esquema de simulación- ECOVIA



El proceso de simulación consta de 5 etapas:

i) Definición de la entrada de usuarios en base a OD: el simulador base su estructura de demandas en la construcción de una matriz OD particular. En base a los flujos existentes de usuarios por parada para una hora de operación en el sentido norte-sur, y la subsiguiente hora de operación en la misma parada en el sentido sur-norte, se construye al elemento  $OD_{ij} = \max\{d_{i,}^{norte-sur}, d_{i,}^{sur-norte}\}$ , es decir la demanda máxima de las posibles demandas direccionales. De esta manera, cada parada es concebida unidireccionalmente y su estructura de destino es atribuida a la estructura original de destino de la matriz inicial OD<sup>3</sup>. En base a estos resultados, se obtiene por minuto y por destino el flujo total de usuarios. La matriz reconstruida es una ampliación de la OD, teniendo en cada posición el total de usuarios por minuto que suben en la parada i y se dirigen hacia la j - la matriz obtenida es diagonal superior  $(153 \times 60)$ <sup>4</sup>

Table 4: Algoritmo simulación ECOVIA - Matriz de Usuarios por origen y Destino

▷ for p (1:N paradas)
for t (1:60)
for d (1:N-1) → $Matriz.OD [d, j] = Poisson(\lambda_{d,j})$

ii) Definición de la agenda y tiempos de recorrdio de los buses: la estructura de ruteo de vehículos se encuentra cimentada en los diagramas de marcha de buses del operador y los tiempos de viaje levantados en los días de encuesta. En particular, el

<sup>3</sup>Es decir, si el máximo es el flujo norte-sur, se preserva para este la estructura de destinos reconstruida gracias a la combinación de encuestas y datos reales de uso

<sup>4</sup>En general, bajo el esquema actual con una simulación de entrada en 60 minutos para n paradas, la dimensión de esta OD detallada es  $(\sum^n n \times 60)$

tiempo de viaje entre paradas se distribuyen uniformemente entre  $[1, 3]$ . Estos tiempos incluyen el tiempo medio de viaje (2 minutos) y el tiempo usual enre desembarque y embarque de pasajeros (máximo 1 minuto). Solamente en la parada inicial, el tiempo de espera es de 2 minutos como máximo. En base a estos datos, se reconstruye una matriz entera de marcha del sistema, la cual posee en sus filas las 17 paradas de recorrido y en sus columnas el número de unidades que brindan servicio durante 1 hora. Cada una de las celdas de esta matriz contiene el tiempo en minutos real (durante la hora) para el cual arriba la unidad de transporte a cada parada. Se respeta en la simulación la idea de no adelantamientos en el trayecto.

Table 5: Algoritmo simulación ECOVIA - Matriz de agenda de buses

▷ for b (1: B buses)
for p (1:N paradas) $\rightarrow$ $Matriz.OD [p, j]$
$Matriz.Agenda [p, b] = t_{p,b} \sim U(1, 3) + Matriz.Agenda [p - 1, b]$

iii) Interacción Bus-Usuario: para lograr la simulación de operación en la red, la matriz OD detallada es colapsada por columnas, , manteniendo su estructura de dila por parada de origen y destino, en intervalos de tiempo particulares, calculados en base a la matriz de agenda de buses. De esta manera, se logra que los usuarios que ingresan al sistema en el intervalo comprendido entre el último bus que servicio a la i-ésima parada y el siguiente que la servirá tenga la posibilidad de ingresar a la red y ser transportados. Para este caso, el bus es considerado como una unidad capaz de llevar a usuarios con diferentes destinos, hasta una capacidad límite de 180. En base a las reglas de comportamiento -esgrimdias en supuestos- de los usuarios, estos abordan el transporte público.

Table 6: Algoritmo simulación ECOVIA - Interacción Bus -Usuario

▷ for b (1: B buses)
for p (1:N paradas)
if $capacidad.libre.bus = 0 \rightarrow$ no ingresan usuarios
if $\sum_j Usuarios.en.espera [i, j] \leq capacidad.libre.bus \rightarrow$ ingresan Usuarios
if $\sum_j Usuarios.en.espera [i, j] > capacidad.libre.bus \rightarrow$ selección aleatoria usuarios que ingresan

iv) Recolección de variables de resultados: la simulación planteada permite el obtener información para cada uno de los buses durante su trayecto en la red. Las



variables de interés en la simulación son los usuarios que logra atender el sistema, los tiempos de espera y viaje de los usuarios, y la capacidad utilizada de los buses en el trayecto.

Table 7: Variables de resultados de la simulación de operaciones - ECOVIA

Variable	Agente	Observaciones cálculo
Usuarios totales	Usuario	obtenida por parada, hasta desagregada a nivel de origen y destino. Su cálculo se basa en la OD original
Usuarios atendidos		obtenida por bus a nivel de usuarios atendidos -transportados- Agregable por parada y para el total del sistema en un hora
Porcentaje demanda atendida	Interacción Bus-Usuario	la razón entre el número de usuarios atendidos frente al número de usuarios totales
Tiempos de espera máximos		obtenidos por parada, el tiempo de espera máximo de un usuario en la parada $i$ se da si éste entró en el minuto subsiguiente a la partida del bus, y debe esperar todo el intervalo hasta la llegada del siguiente.
Tiempos de viaje		obtenidos por bus, por parada
Capacidad utilizada del bus		obtenido por bus por parada, siendo la razón entre el número total de usuarios transportados por el bus en el trayecto de la parada $i$ a $i+1$ frente a la capacidad total del bus.

v) Simulación Montecarlo: el modelo de simulación propuesto para el sistema genera los resultados de solamente una hora de operación. Sin embargo, pudiera ser que la particularidad de una simulación arroje resultados distintos a los de otras operaciones posibles. Para salvar esta limitante, se corren 1000 simulaciones de operación -1000 días independientes cada uno de ellos. En cada caso, se captura los niveles de las variable de resultado, a fin de capturar su distribución de probabilidad y poder resumirlas mediante estadísticos suficientes y densidades.

Para fines computacionales, los 5 pasos de simulación son programados de manera secuencial mediante el lenguaje Python. La simulación se basa en el uso de las librerías `scipy` y `numpy` para la generación de distribuciones de probabilidad y matemática de los cálculos. El `idle` de programación es el programa `Spyder 2.0`. Todas las simulaciones requirieron ser corridas desde la consola del sistema operativo. Para el procesamiento de la simulación se utilizó un computador `i7` de 8 núcleos con RAM 8GB, obteniendo tiempos por simulación inferiores al segundo, para un total de ejecución de simulación inferior a los 5 minutos. El procesamiento estadístico de los resultados se lo realizó en `R-Studio`.

## Parte V

# EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA Y RESULTADOS

## 5 Preámbulo

En este capítulo se reporta de manera comparativa 4 distintos marcos de simulación comparados bajo dos criterios de investigación de operaciones.

El primer escenario simula la operación del sistema actual bajo las soluciones utilizadas por los operadores actuales de la ECOVIA tanto para flota como para agenda. En los siguientes tres escenarios, se propone un esquema de tiempos de salida proporcionales cada 2,3 y 4 minutos, respectivamente. Estos escenarios permiten explorar el efecto que tiene la reducción de la flota y el cambio de la agenda de salida sobre las variables del sistema. En todos los casos, a través de simulaciones montecarlo -1000 simulaciones- se reconstruye la dinámica del sistema y las variables de resultados. Las simulaciones son realizadas por hora en base al esquema de demanda máxima por parada<sup>5</sup> incluyendo dos tipos de horario, el tipo A (16:00 a 17:00 y regreso de la unidad de 17:00 a 18:00) y el tipo B (17:00 a 18:00 y regreso de la unidad de 18:00 a 19:00). Cada horario posee su matriz OD.

Todos los escenarios son comparados bajo dos categorías de investigación de operaciones. La primera es el nivel de servicio a los usuarios, donde se recogen las variables de tiempos de espera, tiempos de viaje y nivel de atención de la demanda. El segundo nivel son los costos de operación, abordados no directamente sino a través de variables operativas proxies como el número de unidades por hora y el nivel de ocupación de las unidades en la red. En todos los casos, se analizan gráficos de distribución de las variables, la esperanza<sup>6</sup>, varianza<sup>7</sup>, percentil 50<sup>8</sup> y la entropía de las

<sup>5</sup>En base a lo propuesto en el esquema de simulación del capítulo anterior.

<sup>6</sup>Donde  $E(x)$  es aproximado por el estimador insesgado de la media muestral,  $\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n-1}$

<sup>7</sup>Donde  $V(x)$  es aproximado por el estimador insesgado muestral,  $\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{X})^2}{n-2}$

<sup>8</sup>Entendido como la media en una distribución de probabilidad,  $\int_{-\infty}^{Mediana} f(x)dx=0.5$

Table 8: Escenarios de simulación - ECOVIA

Escenario	Horario	No. Buses	Intervalos de salida
Sol Operador	A	29	2 a 3 minutos según diagrama de marcha del sistema
	B		
Sim2	A	30	intervalos exactos de 2 minutos
	B		
Sim3	A	20	intervalos exactos de 3 minutos
	B		
Sim4	A	15	intervalos exactos de 4 minutos
	B		

distribuciones<sup>9</sup>.

## 5.1 Resultados en el Nivel de Servicio

El nivel de servicio para los usuarios, en transporte público, esta asociado a la cobertura de la demanda, tiempos de viaje y el nivel de comfort durante el viaje.

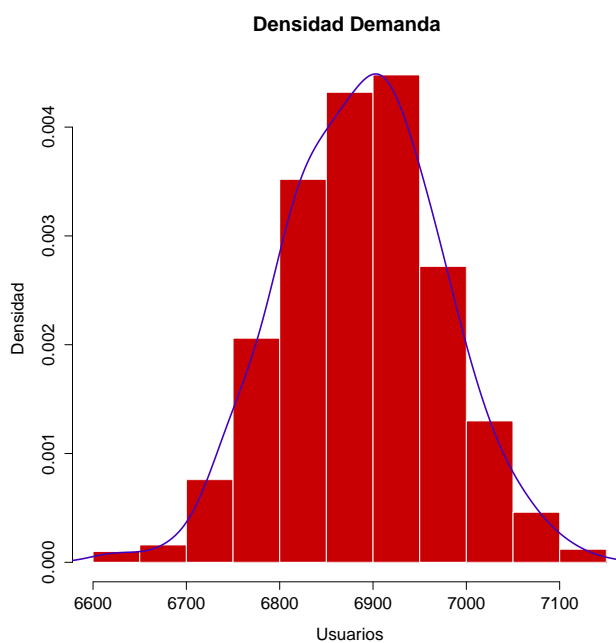
El primer marcador es claro, y posee su medición en los tiempos de espera del usuario hasta el arribo de una unidad al andén de espera, y los tiempo totales de viaje. En cuanto al nivel de comodidad, esta variable se la incorpora<sup>10</sup>de manera determinística fijando el número máximo de usuarios que suben a cada unidad en 180- fijando la vara 20 usuarios por debajo de la capacidad real por bus (200 usuarios). Finalmente, el nivel de servicio ve su reflejo en la cobertura de la demanda que se logra durante una hora de atención. Las variables en mención son obtenidas como resultado del simulador de operación, recuperando sus realizaciones para todo el sistema.

En el rubro de cobertura de demanda, el sistema ecovía presenta una carga total de usuarios, en base a los datos de la matriz Origen-Destino, de 6892 pasajeros para el horario tipo A y de 7447 pasajeros para el tipo B. La simulación muestra en ambos casos, realizaciones del sistema alrededor de los valores base, con una diferencia no mayor/menor a 300 usuarios.

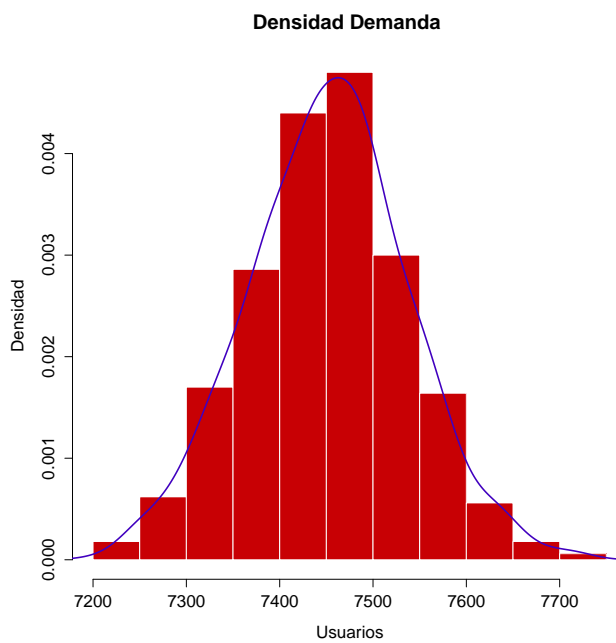
<sup>9</sup>Entendido como  $-\sum_{i=1}^n p(x_i) \ln(p(x_i))$

<sup>10</sup>Según se menciona en el apartado IV, en el subcapítulo de Supuestos de simulación.

Figure 4: Demanda del Sistema Ecovia



(a) Horario Tipo A



(b) Horario Tipo B

En base a la demanda, la simulación de operación muestra los siguientes resultados globales del sistema para distintos los escenarios de simulación.

Table 9: Estadígrafos de Resumen de las Variables asociadas al nivel de Servicio - Horario Tipo A

## (a) Usuarios atendidos

Estadístico	SolOp	Sim2	Sim3	Sim4	1E
Entropía	6.907	6.907	6.908	6.908	6.907
Entropía Max	6.909				
Media	6839.876	6844.452	6680.444	6164.427	517.447
Mediana	6841	6844	6681	6166	517
DvEst	84.977	80.885	56.899	70.996	25.011
Q5	6704.95	6715	6586.95	6047.95	477
Q95	6980.05	6981.05	6772.05	6275.05	560

Estadístico	SolOp	Sim2	Sim3	Sim4	1E
Entropía	6.907	6.907	6.907	6.907	6.906
Entropía Max	6.908				
Media	99.29%	99.29%	96.93%	89.41%	7.51%
Mediana	99.30%	99.29%	96.93%	89.43%	7.49%
DvEst	0.10%	0.10%	1.38%	1.01%	0.37%
Q5	99.12%	99.13%	94.65%	87.76%	6.91%
Q95	99.45%	99.46%	99.21%	90.99%	8.12%

## (b) Porcentaje atendido de la demanda

Estadístico	SolOp	Sim2	Sim3	Sim4	1E
Entropía	13.0316	13.06579	12.62527	12.31606	9.612797
Entropía Max	13.10926				
Media	4.119645	4.21792	4.614953	5.365096	18.571
Mediana	4	4	5	5	18
DvEst	1.493355	1.724779	2.340416	2.857523	10.622
Q5	2	2	2	2	2
Q95	7	7	8	10	36

## (c) Tiempos espera máximos

Estadístico	SolOp	Sim2	Sim3	Sim4	1E
Entropía	10.271	10.304	9.897	9.609	6.904
Entropía Max	10.276				
Media	41.195	41.173	42.274	43.214	35.669
Mediana	41	41	42	43	36
DvEst	4.087	4.078	4.618	4.974	2.909
Q5	35	35	35	35	31
Q95	48	48	50	52	40

## (d) Tiempo Total de Viaje

El escenario de simulación E1 permite conocer el estado del simulador y el sistema con solamente una unidad en servicio. Si este fuese el caso, un bus transporta en promedio 517 usuarios, atendiendo el 7.51% de la demanda existente para el horario. EL tiempo de espera máximo promedio en el sistema con una sola unidad en operación es de 18.57 minutos. EL tiempo estimado de viaje, el 95% de las veces que de servicio el bus, se encontrará entre 31 y 40 minutos.

En el caso del horario tipo A, la solución del operador ofrece un alto nivel de cobertura de la demanda y tiempos de espera máximos no superiores a 4 minutos, en promedio. Soluciones de menor número de unidades -Sim3 y Sim4- muestran tiempos de espera máximos promedio superiores en 1 minuto. En cuanto a la cobertura de la demanda, la solución del operador barre el número de pasajeros casi en su totalidad. Para la simulación de 20 unidades, se logra un nivel de cobertura del 96%, mientras una reducción de la flota en 5 -Sim4- decrece el nivel de cobertura, ubicándose en 89%. La solución de 30 unidades - Sim2- atiende en niveles promedio y de distribución similares a la solución del operador. De los resultados obtenidos se esgrime que desde el punto de vista del usuario, la solución del operador cubre casi toda la demanda en su extensión con tiempos de espera en los rangos [2,7]y de viaje [35, 48], al menos el 95% de las veces que opere el sistema.

Table 10: Estadígrafos de Resumen de las Variables asociadas al nivel de Servicio - Horario Tipo B

## (a) Usuarios atendidos

Estadístico	SolOp	Sim2	Sim3	Sim4	1E
Entropía	6.90768	6.907692	6.907711	6.907687	6.905589
Entropía Max	6.907755				
Media	7399.492	7405.361	6858.75	6432.858	517.4705
Mediana	7402	7394.5	6860	6433	517
DvEst	85.16107	83.14319	64.66213	75.31578	25.01252
Q5	7256.85	7256.95	6753.95	6306	477
Q95	7535	7535	6962	6552	560

Estadístico	SolOp	Sim2	Sim3	Sim4	1E
Entropía	6.907	6.907	6.907	6.907	6.906
Entropía Max	6.908				
Media	99.29%	99.29%	92.04%	86.40%	6.95%
Mediana	99.29%	99.29%	92.09%	86.44%	6.94%
DvEst	0.09%	0.10%	1.14%	1.03%	0.34%
Q5	99.12%	99.13%	90.08%	84.68%	6.40%
Q95	99.44%	99.46%	93.92%	88.03%	7.52%

## (b) Porcentaje atendido de la demanda

Estadístico	SolOp	Sim2	Sim3	Sim4	1E
Entropía	13.03137	13.06568	12.62538	12.31671	9.610982
Entropía Max	13.07417				
Media	4.122071	4.217274	4.615622	5.360074	18.33672
Mediana	4	4	5	5	18
DvEst	1.497879	1.728412	2.338457	2.846166	10.53367
Q5	2	2	2	2	2
Q95	7	7	8	10	35

## (c) Tiempos espera máximos

Estadístico	SolOp	Sim2	Sim3	Sim4	1E
Entropía	10.234	10.303	9.897	9.609	6.904
Entropía Max	10.276				
Media	41.185	41.192	42.274	43.207	35.227
Mediana	41	41	42	43	35
DvEst	4.108	4.131	4.630	4.931	2.918
Q5	35	35	35	35	31
Q95	48	48	50	52	40

## (d) Tiempos Viaje

En el caso del horario tipo B, el escenario de simulación E1 transportaría en promedio el mismo número de usuarios, sin embargo, atendiendo solamente el 6.95% de la demanda existente para el horario. EL tiempo de espera máximo promedio en el sistema con una sola unidad en operación es de 18.33 minutos. En el caso del tiempo estimado de viaje los intervalos de minutos de viaje son los mismos que en el horario anterior.

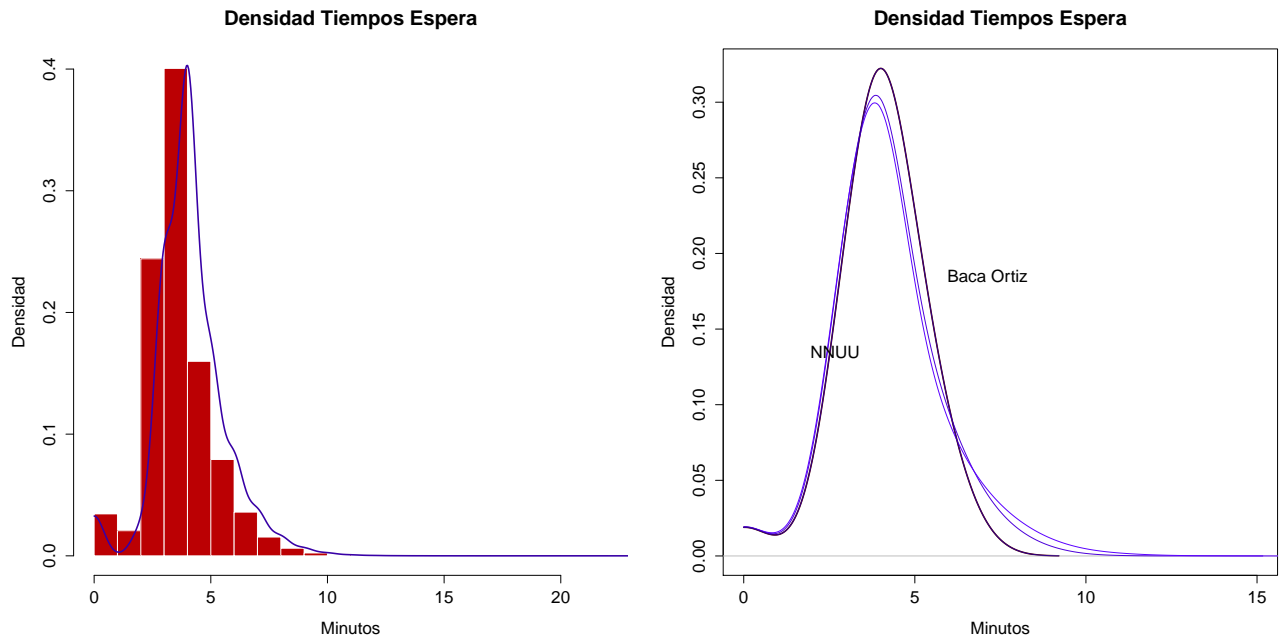
Para el horario tipo B, la solución del operador continua ofreciendo el mayor nivel de cobertura de la demanda y menores tiempos promedios de espera y viaje; sin embargo, en no más de 1 minuto comparado con otros escenarios. En cuanto a la cobertura de la demanda, la solución del operador transporta en promedio al 99.29% de los pasajeros del horario; los escenarios Sim3 y Sim4 logran un nivel de cobertura promedio de 92.04% y 86.40%, respectivamente. De los resultados obtenidos se refuerza la idea de intervalos de tiempos de viaje apenas inferiores del operador frente al resto de escenarios - con la salvedad del escenario de 30 unidades, Sim2.

Al someter a la solución actual del operador a comparación estadística con cada una de las simulaciones alternativas, se determinan diferencias significativas en promedio para los tiempos de viaje y cobertura de la demanda, para los horarios tipo A y B. Por lo tanto, la solución del operador es inferior en tiempos promedio de viaje y espera y superior en número de usuarios transportados . En cuanto a distribución, las medidas de entropía muestran diferencias superiores a 1 decima para los tiempos de espera en comparación con los escenarios Sim3 y Sim4. En el caso de la cobertura de la demanda, las diferencias solo se registran en promedio, transportando la solución actual del sistema 86 y 533 pasajeros más en promedio, en comparación con Sim3. Sin embargo, cabe señalar que el único escenario estadísticamente superior en el nivel de esperanza es la simulación de envío de buses cada 2 minutos - enviando 1 bus más por hora en relación a los 29 que operan bajo la solución actual del operador.

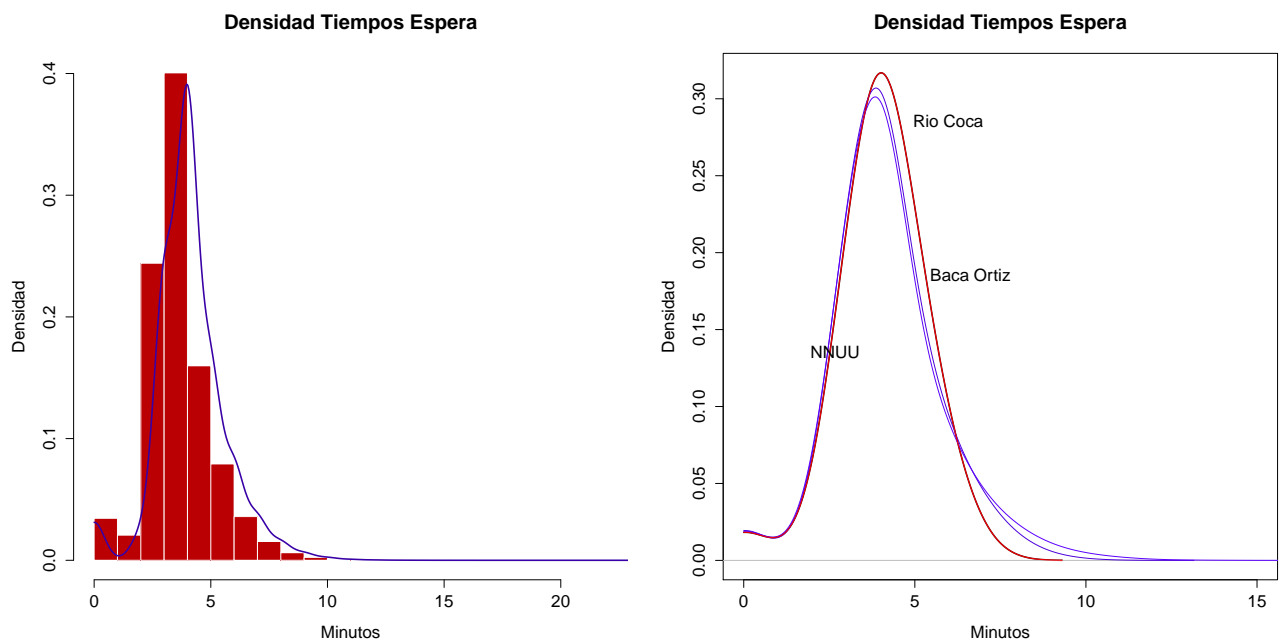
Al analizar los tiempos de espera por parada de la solución del operador, se observa similitud en los promedios, sin embargo, para las paradas de mayor flujo - Río Coca, Naciones Unidad, Baca Ortiz- se ve una diferencia en las colas, teniendo las paradas de Baca Ortiz y Naciones Unidades tiempos de espera mayores, con máximos de espera de hasta 15 minutos - lo cual representa una espera de cerca de 8 unidades hasta lograr abordar el sistema.



Figure 5: Distribución de los tiempos de espera máximos del sistema Ecovia - Solución del Operador



(a) Horario Tipo A

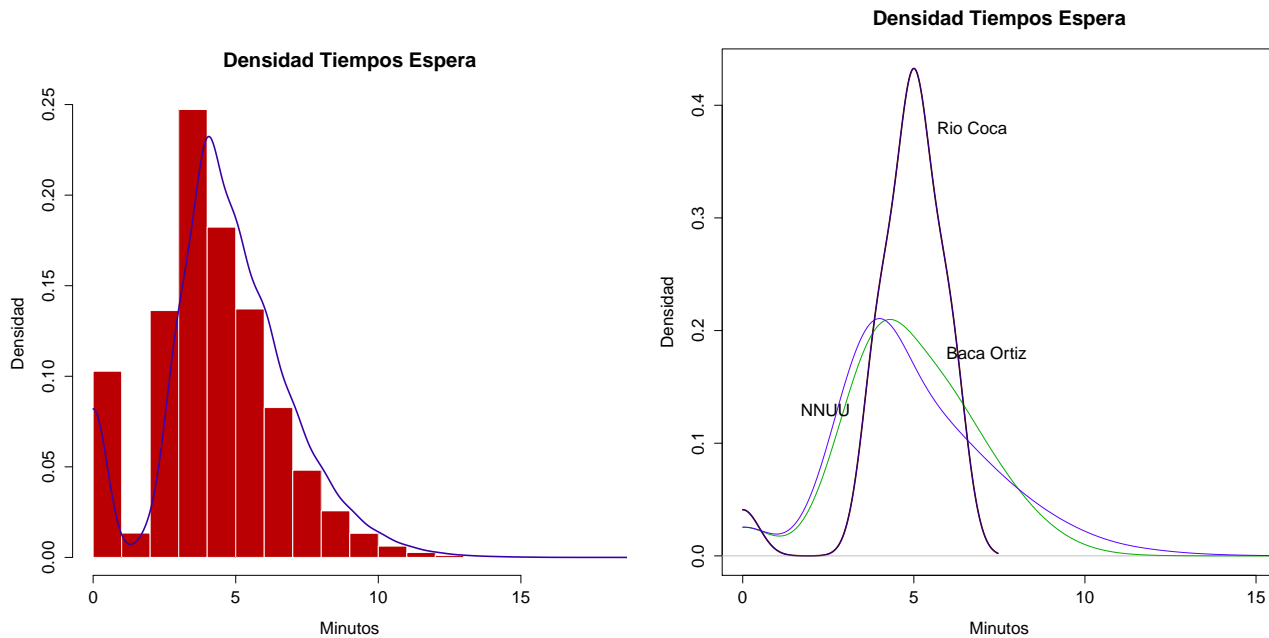


(b) Horario Tipo B

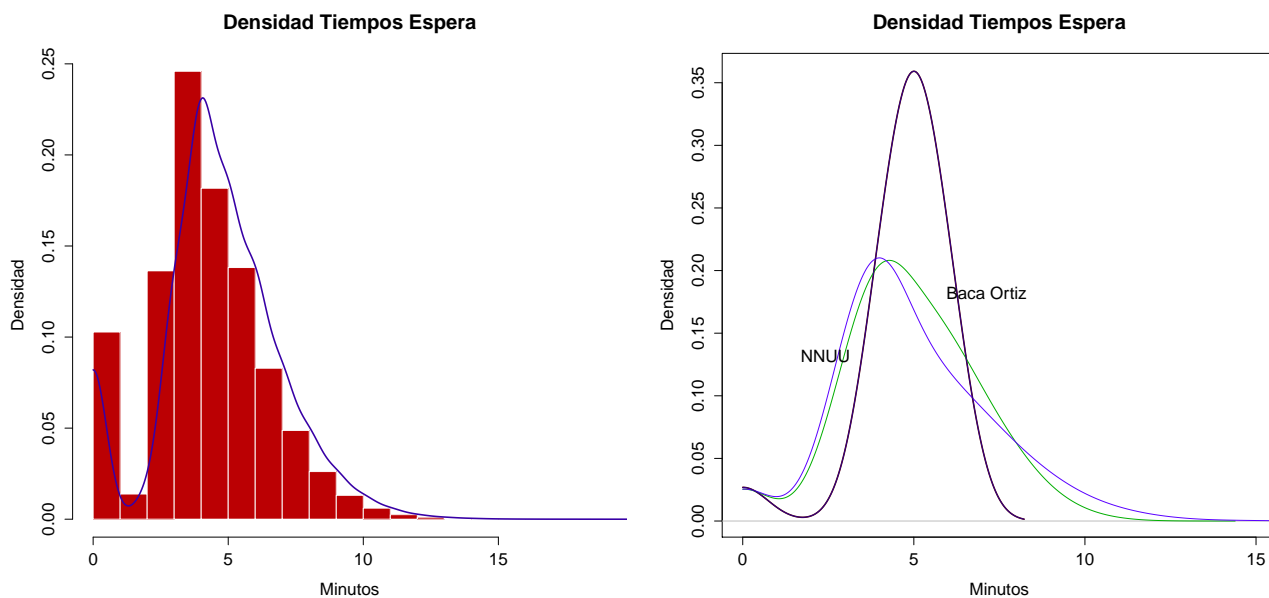
En el caso de la solución Sim3, de menor número de requerimiento de flota, se ob-

serva a nivel de distribución un mayor promedio de viaje por parada - cerca de 1 minuto más. En el caso de los tiempos máximos, se mantiene la espera máxima cercana a los quince minutos, pero con un incremento leve de usuarios que tienen que esperar este tiempo. De la lectura de los tiempos de espera por parada, se rescata que la solución del operador ofrece un tiempo promedio por parada menor, pero con máximos permitidos similares a la solución Sim3.

Figure 6: Distribución de los tiempos de espera máximos del sistema Ecovia - Solución Sim3



(a) Horario Tipo A

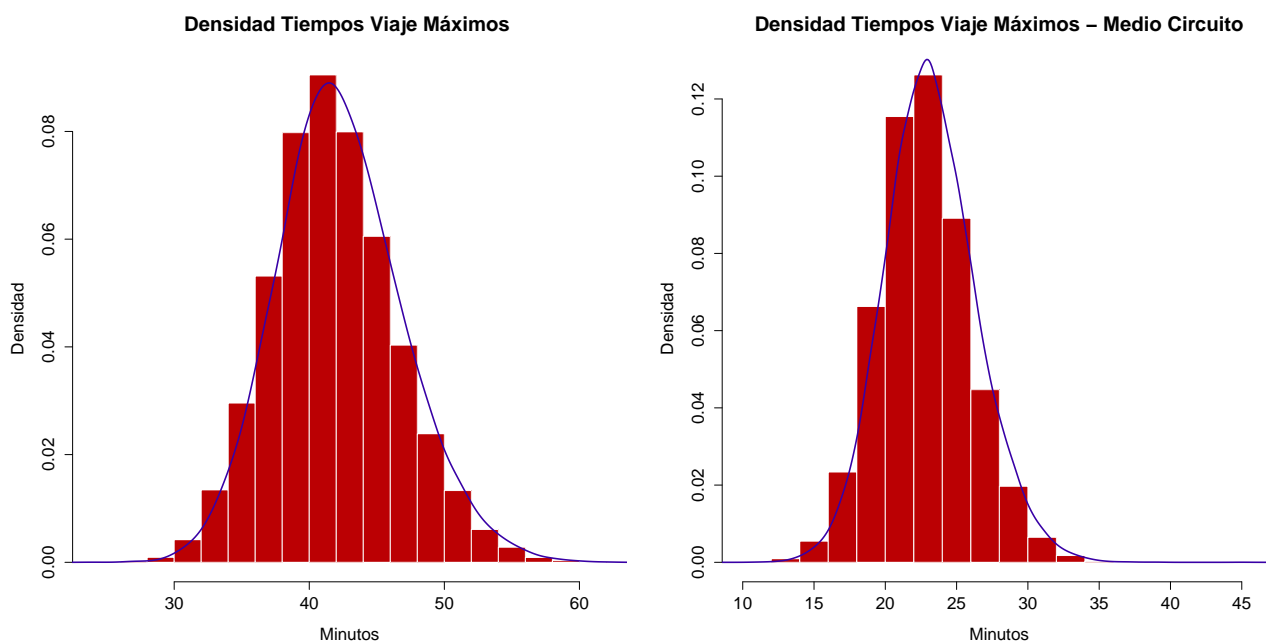


(b) Horario Tipo B

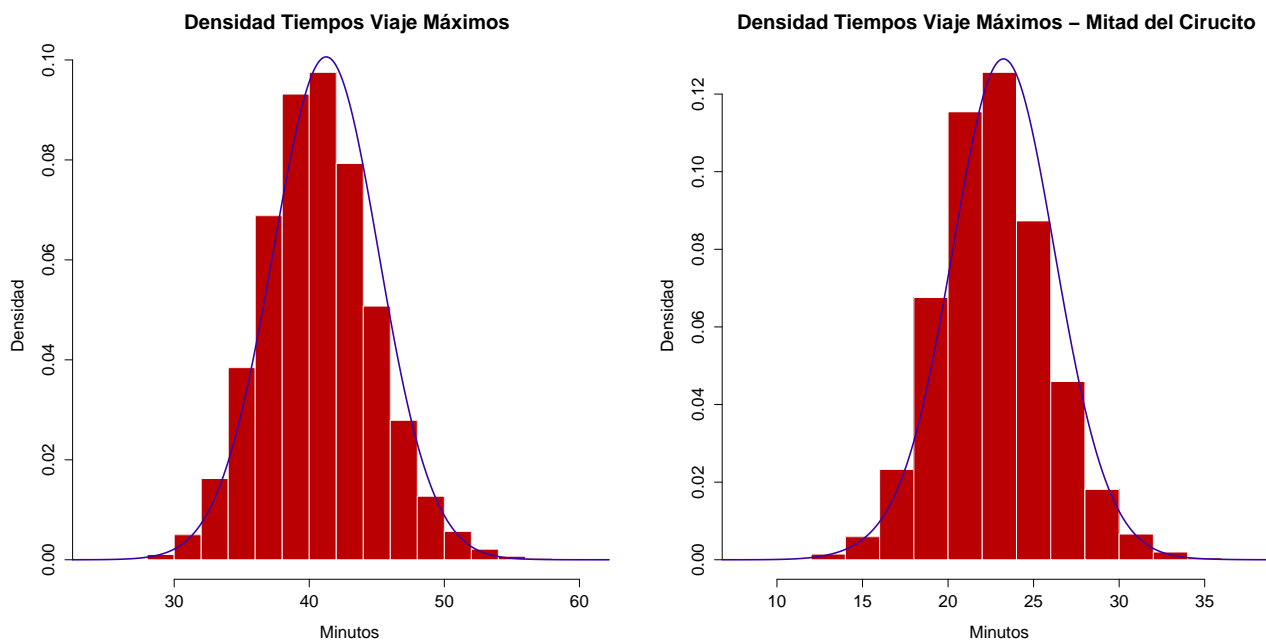
La distribución de los tiempos de viaje muestra como la solución del operador para un viaje completo en el circuito, tiene un intervalo de tiempos de viaje entre 30 y 60

minutos. En el caso del medio viaje, el trayecto de mitad de viaje - en este caso Norte- implica cerca del 60% del tiempo de 1 viaje entero en el sistema, con un promedio de 23 minutos - comparado a 24 minutos de la solución Sim3.

Figure 7: Distribución de los tiempos de viaje del sistema Ecovia - Sol Operador



(a) Horario Tipo A



(b) Horario Tipo B

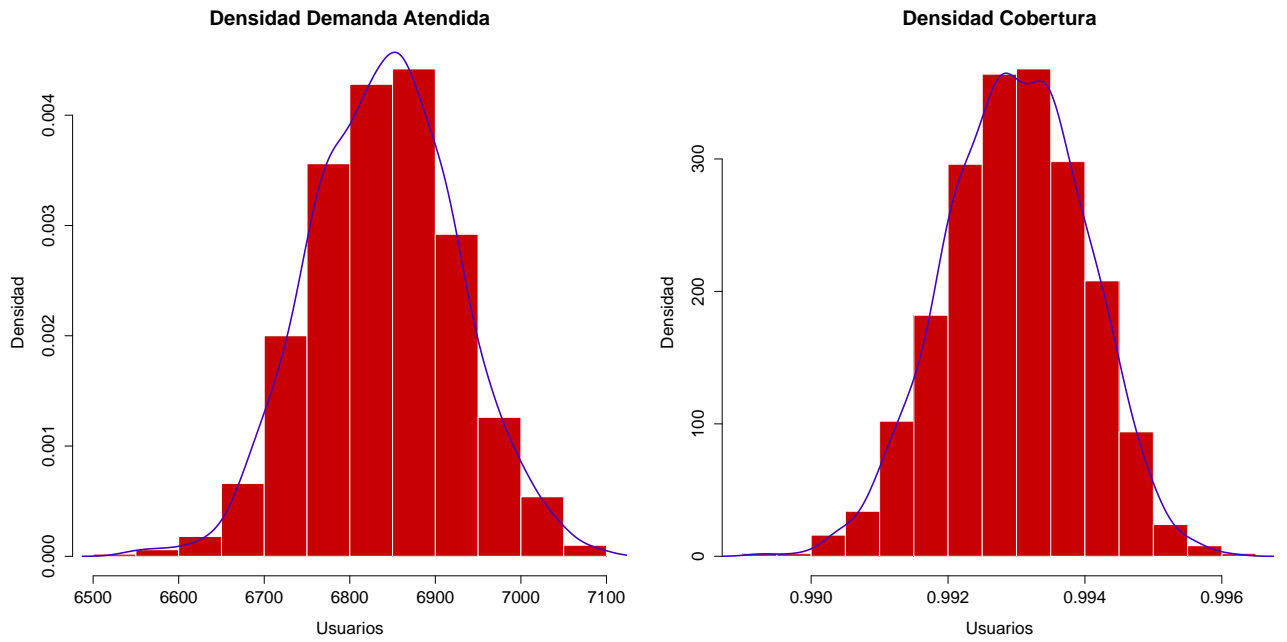
El nivel de servicio muestra la efectividad en cobertura de la demanda. En el caso de su distribución, la solución del operador es la de menor varianza y promedio, barriendo

más del 99 % de la demanda. EL operador, en promedio, deja de atender entre 48 usuarios dentro del horario A y 52 en el B. La solución Sim3 deja sin atención efectiva a 217 y 590 usuarios en cada caso.<sup>11</sup>

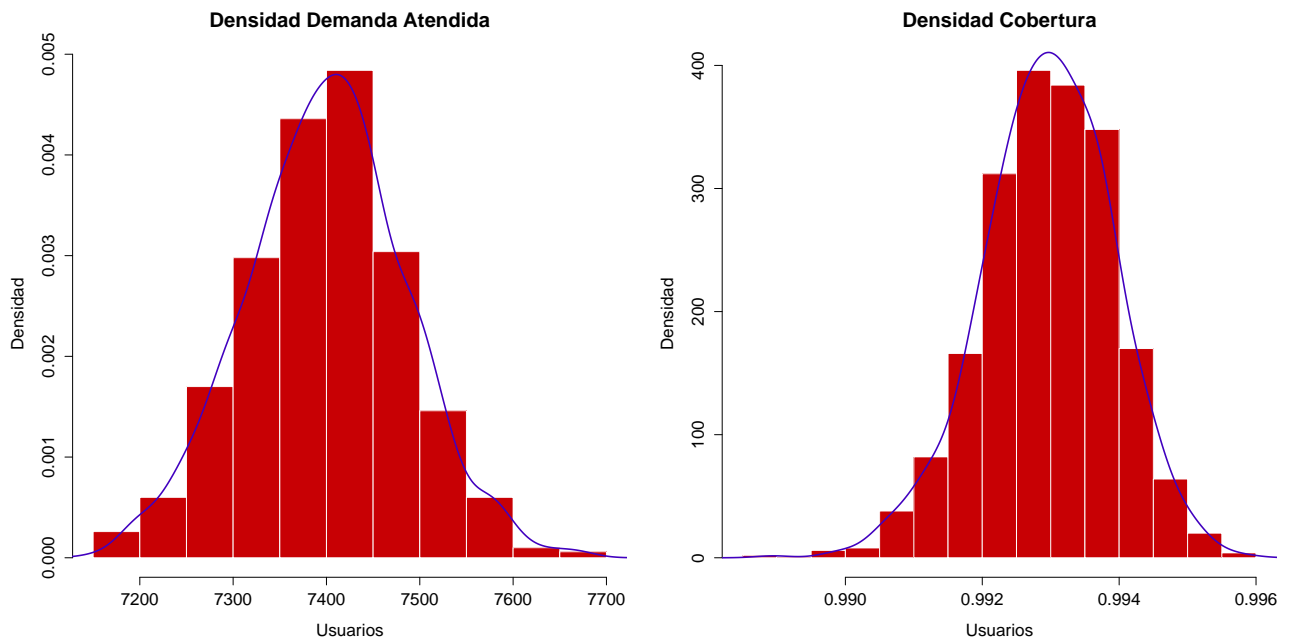
---

<sup>11</sup>Notese que el dejar sin atención a usuarios implica no transportarlos durante el horario, sin embargo; estos usuarios serán transportados en el siguiente horario.

Figure 8: Distribución del nivel de cobertura del sistema Ecovia - Sol Operador



(a) Horario Tipo A



(b) Horario Tipo B

## 5.2 Resultados asociados al Costo de Operación

En los sistemas de transporte público, la atención se centra también en la arista del operador. Un nivel de operación óptimo es aquel que se aproxima al menor costo. Dentro de este marco, el modelo de simulación propuesto no incorpora variables directas de costo - i.e coeficientes de desgaste por rodaje, coeficientes de uso de combustible por kilometro recorrido, entre otros. Sin embargo, la determinación del tamaño de flota es la variable de relación directamente con el costo de operación. Un número menor de unidades rodando en el sistema, permite un menor costo de operación.

Table 11: Resumen variables asociadas al costo de operación

Escenario	Horario	No. Buses	Pasajeros promedio por bus	Capacidad utilizada promedio
SolOp	A	29	253.328	63.45%
	B		255.154	69.46%
Sim2	A	30	228.148	57.95%
	B		246.512	63.36%
Sim3	A	20	330.412	89.15%
	B		338.196	92.87%
Sim4	A	15	410.961	92.66%
	B		428.857	94.33%
E1	A	1	517.447	79.96%
	B		517.470	79.95%

En cuanto a la determinación de la flota, la solución actual del operador alcanza niveles promedio de utilización de los buses entre el 60% y 70%, para los horarios A y B. La ejemplificación de una unidad en la red, muestra que pese a ser la capacidad estática 180 pasajeros, una unidad es capaz de llevar en promedio 517 pasajeros a lo largo del circuito. Esta carga sin duda alguna está determinada por la estructura de la red, las demandas que se posee por parada y el flujo de entrada de los usuarios.<sup>12</sup> Las soluciones de simulación propuestas, Sim3 y Sim4, muestran como es factible mejorasen el nivel de capacidad utilizada por bus, con niveles en promedio superiores al 80%.<sup>13</sup> Al observar la estructura de la capacidad utilizada por unidad en la red, se observa para la solución del operador, en los horarios A y B, niveles de utilización

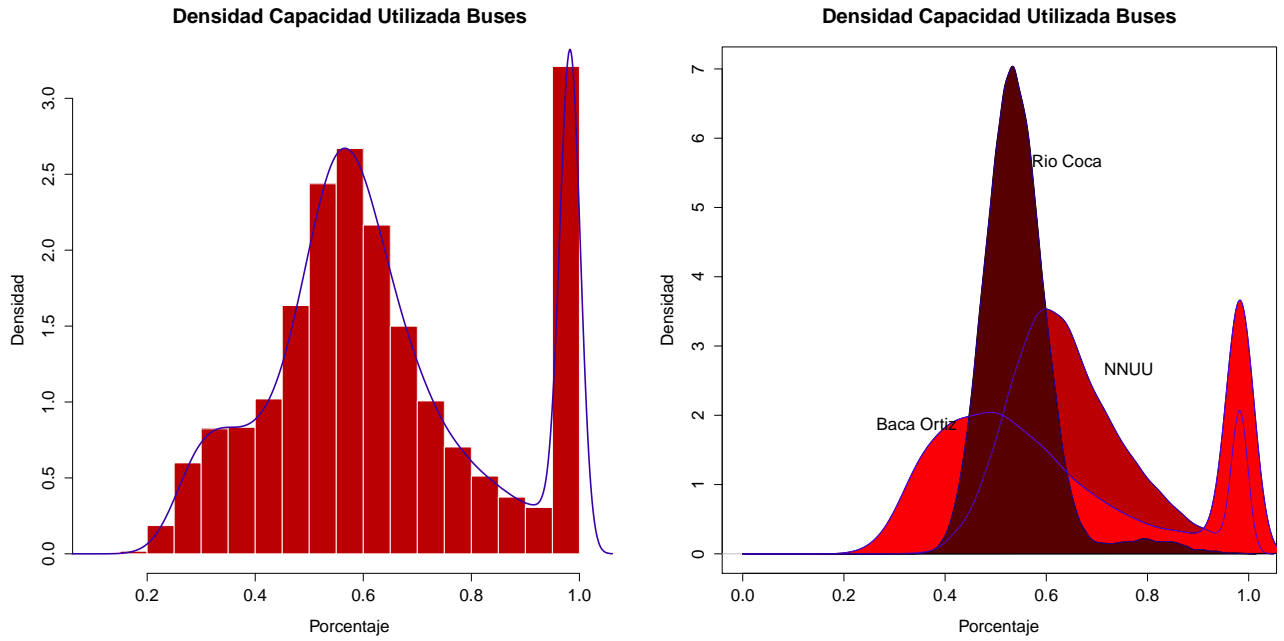
<sup>12</sup>Nótese que un bus en la red transporta a lo sumo  $CapMaxBus * NoParadas$ , si a cada turno de circulación todos los usuarios de la parada  $i$  desembarcan en la parada  $i + 1$

<sup>13</sup>En estricto rigor, al simular con 180 pasajeros, el 90% de la capacidad real de cada unidad, la solución del operador, en promedio, tiene una capacidad de utilización verdadera de 57.11% para el horario A, y 62.51% para el horario B.

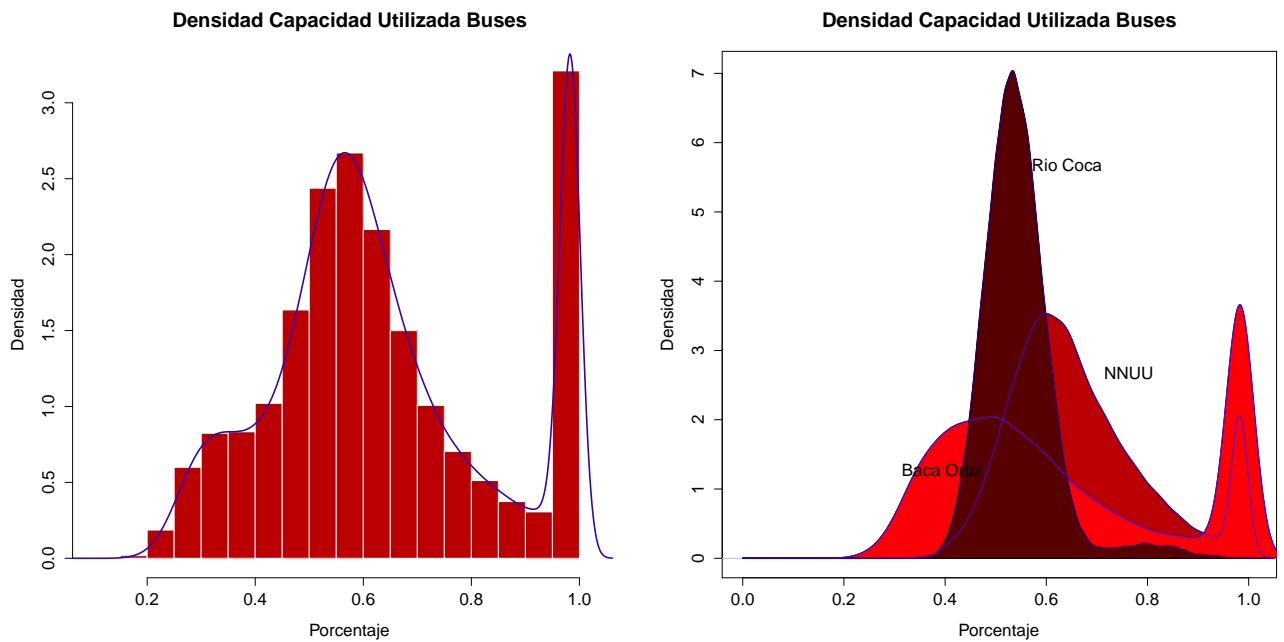


promedio en Río Coca entre [54.5%, 59.6%], Naciones Unidas [67.0%, 71.33%] y Baca Ortiz [64.47%, 71.54%]. Estas tres paradas corresponden a cerca del 50% de envío de flujo de usuarios en la red. A la par, se observa distribuciones segadas con cola derecha pesada en el caso de las paradas intermedias Naciones Unidas y Baca Ortiz. En las parada Naciones Unidas el 13% de los buses que llegan se copan con al menos 162 usuarios (90% de la capaicidad del bus). En el caso de Baca Ortiz son el 35% y en Río Coca apenas el 1% .

Figure 9: Distribución de la capacidad utilizada de los buses del sistema Ecovia - Sol Operador



(a) Horario Tipo A

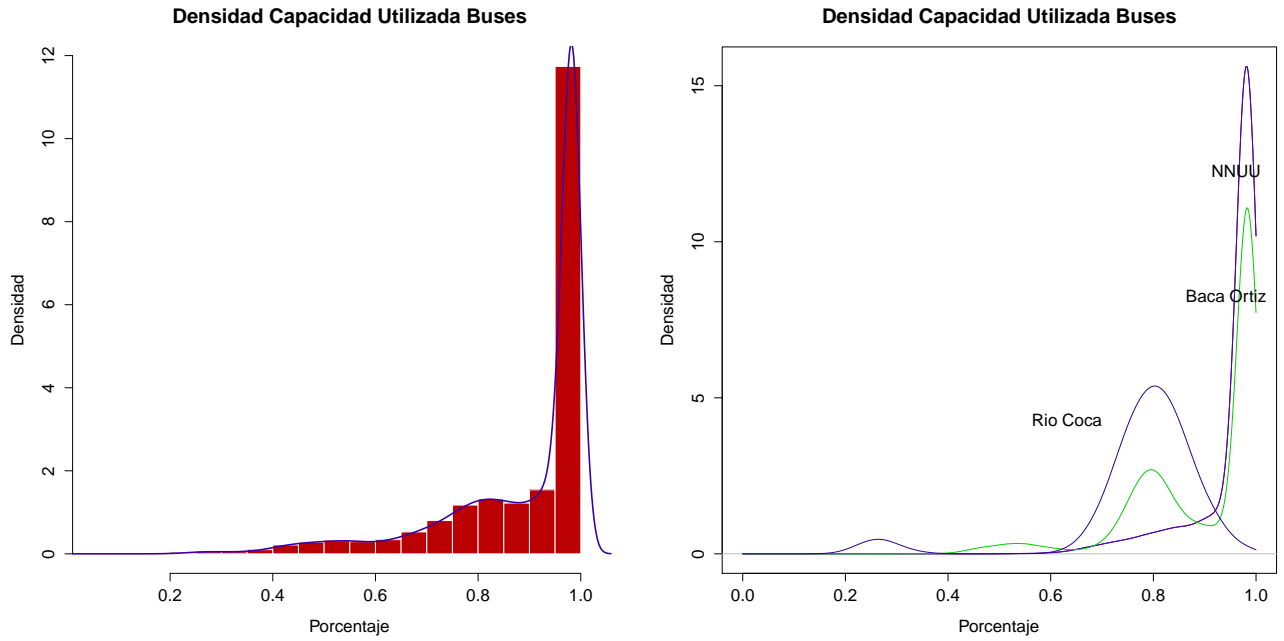


(b) Horario Tipo B

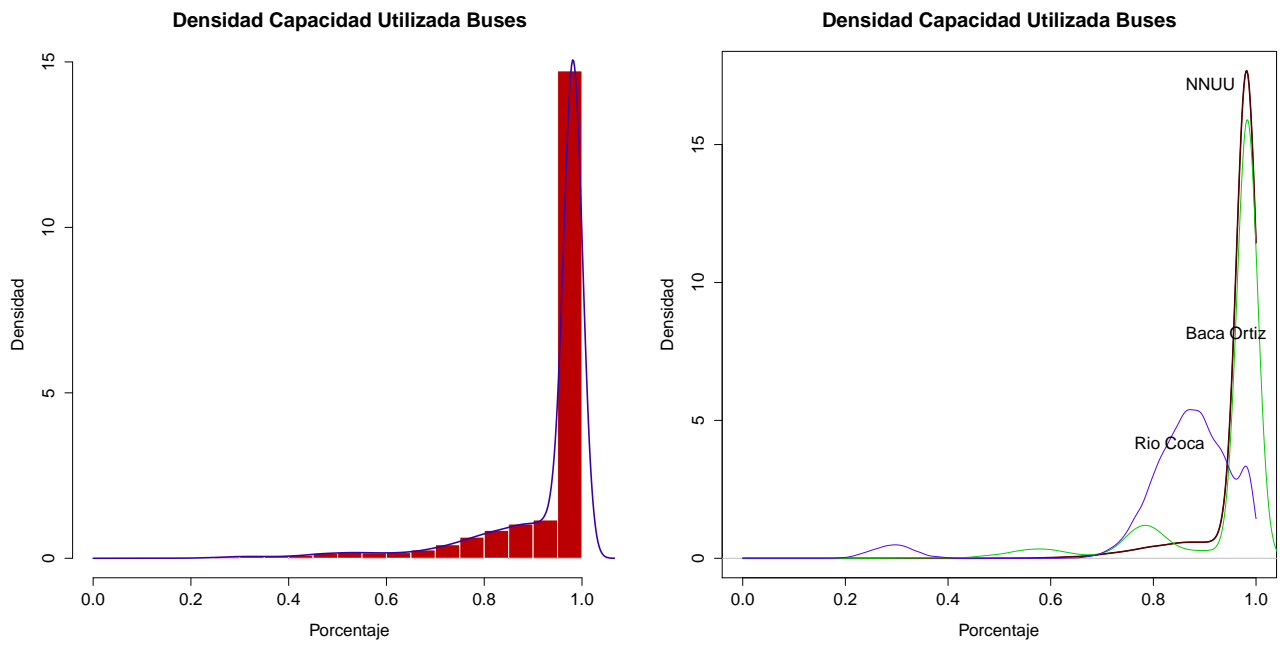
En el caso de la solución de 20 buses, Sim3, su estructura de la capacidad utilizada

por unidad en la red en los horarios A y B muestra niveles de utilización promedio en Rio Coca entre [77.74%, 84.81%] , Naciones Unidas [95.6%, 96.39%] y Baca Ortiz [89.27%, 93.46%] . El envío de un número de buses menor en la red ocasiona un incremento sustancial en el aprovechamiento de la capacidad utilizada de los buses, acotando que en el caso de las paradas intermedias el 10% de las unidades alcanza niveles de saturación -180 usuarios.

Figure 10: Distribución de la capacidad utilizada de los buses del sistema Ecovia - Solución Sim3



(a) Horario Tipo A



(b) Horario Tipo B

### 5.3 Conclusiones y Propuesta

En base al análisis realizado en simulación de la red se observa:

- El sistema ecovía posee tiempos promedios de viaje entre 36 y 60 minutos
- Los tiempos de espera son una función del número de buses. Bajo la solución actual, el operador con 29 buses genera tiempos de espera promedios máximos de 4 minutos; sin embargo, con picos de espera de hasta 15 minutos en las paradas de mayor flujo de usuarios.
- El nivel actual de cobertura de la demanda en los horarios A y B es alto (99%).
- El sistema posee una capacidad utilizada promedio, apenas superior al 60%. Contrafactuales de utilización de menor flota (20 y 15 buses) muestran que es posible aumenta la capacidad utilizada promedio a niveles al menos cercanos al 80%.
- Del análisis realizado, existe un trade off entre número de flota empleada y el nivel de servicio. Mayores niveles de servicio requieren una agenda de buses mayor y más continua, lo cual incurre en un costo mayor para el sistema.

En base a los hechos estudiados de la solución del operador, una mejora en la solución de la agenda y flota debería ser aquella que mantenga los niveles de servicio actuales y amenore el costo de operación. De manera directa, se propone un algoritmo de cálculo que permite explorar posibles mejoras en base a mantener el nivel de servicio promedio inalterado y mejor la capacidad promedio de utilización de las unidades del sistema. Esta solución de búsqueda pudiera ser explorado a lo largo de todos los posibles tamaños de flota, con todas las posibles agendas de salida para una hora de operación. Para simplificar la búsqueda, se reduce el intervalo de búsqueda entre los 21 y 28 buses, debido a que en el límite superior se encuentra la solución actual, y en el límite inferior la solución no cumple con los mismos niveles de servicio, pese a amenorar el costo (tamaño de flota menor).

A fin de comparar el conjunto de posibles soluciones se recurre a los conceptos de optimización multiobjetivo. Donde poseemos tres funciones objetivo, asociadas a maximizar la capacidad utilizada de los buses, amenorar el tiempo de viaje, y maximizar el nivel de servicio con el menor número de flota posible. Bajo este esquema, una solución  $x_i$  domina a  $x_j$  ( $x_i \preceq x_j$ ) si cumple con: (i)  $x_i$  no es peor que  $x_j$  en todos

los objetivos, y (ii)  $x_i$  es estrictamente mejor a  $x_j$  en al menos un objetivo. Dado la visión de simulación estocástica presente en la reconstrucción de la dinámica de la red ECOVIA, este concepto de dominancia de las soluciones no es puntual. Es decir, cada escenario de simulación no posee solamente un valor verdadero, sino una distribución de probabilidad para cada una de las variables objetivo. En base a esto, se redefine la dominancia en términos de la esperanza de las variables objetivo, es decir se busca mejoras estadísticas significativas relativas a la solución actual del operador -en simultáneo- para las variables del nivel de servicio y capacidad utilizadas de los buses. A continuación se presenta un algoritmo heurístico de mejora.

Table 12: Algoritmo heurístico de búsqueda de mejora en los niveles promedio de solución

▷ for sim (1:8)
for (1:1000) Simulación Operador ( $N_{bus} = 20 + sim$ )
Prueba t - Usuarios atendidos(sim) frente operador $\rightarrow p_1$
Prueba t - Tiempos espera (sim) frente operador $\rightarrow p_2$
Prueba t - Capacidad utilizada (sim) frente 80% $\rightarrow p_3$
if $p_1, p_2, p_3 < 0.05 \rightarrow$ Solución Mejorada
if existe un ( $p_k > 0.05$ y $variable_k(sim) > variable.operador$ ) y ( $p_{\neq k} < 0.05$ ) $\rightarrow$ Solución Mejorada (dominante)

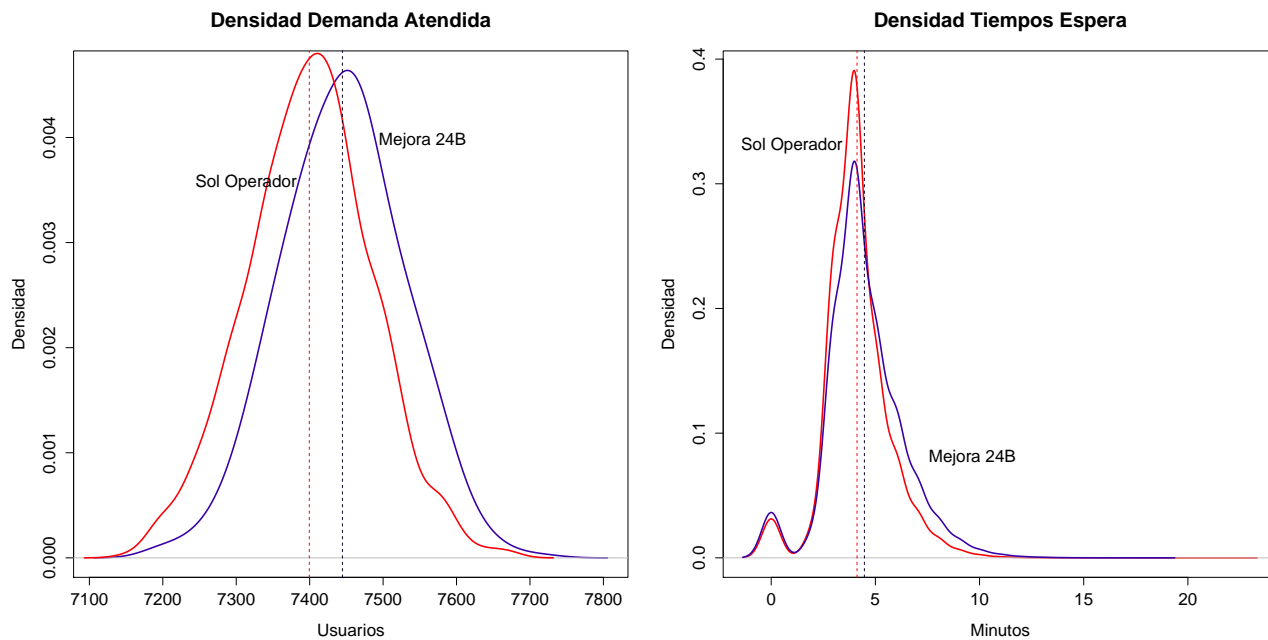
El algoritmo de mejora fue corrido para el horario B, al ser el de mayor número de usuarios. Sin embargo, esta búsqueda no arrojó resultados positivos, fallando en todos los casos el criterio de tiempos de espera. Ante esto, se corrió un algoritmo menos restrictivo que implique solo mejoras promedio en capacidad utilizada, manteniendo inalterado el número de usuarios transportados durante una hora. De esta simulación, se obtuvo como solución mejorada el uso de 24 buses, con una capacidad promedio utilizada de 84.73% transportando 7444 usuarios, en promedio.

Table 13: Estadígrafos de Resumen - Solución de mejora 24 Buses

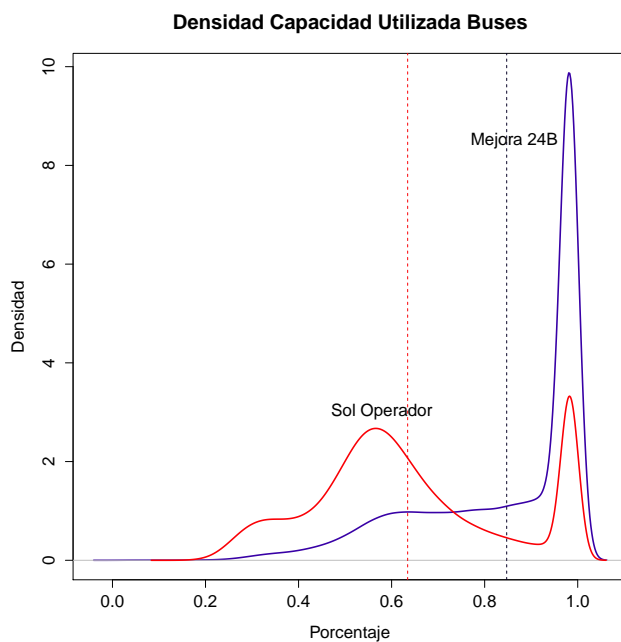
Estadístico	Usuarios atendidos	Tiempo espera máximos	Capacidad Utilizada
Entropía	6.907	12.824	12.896
Media	7444.587	4.472	84.73%
Mediana	7448	4	95%
DvEst	83.368	1.807	17.54%
Q5	7310.90	2	50%
Q95	7581.05	8	98.89%

En resumen general, la nueva solución refleja un mejor nivel promedio de usuarios transportados, con tiempos de espera promedio apenas superior en 0.3532 minutos transportando al 95% de los usuarios que requieren viajar todo el circuito en un tiempo máximo de 49 minutos - un minuto por encima de la solución del operador. En el caso de la capacidad utilizada, esta se eleva 4 puntos por encima del nivel de operación propuesto como deseado (80%). El ahorro directo en el costo es la disminución en 4 unidades de la flota.

Figure 11: Distribución de las variables de solución de mejora 24 Buses frente a la solución del operador.



(a) Nivel de servicios ([— Esperanza])



(b) Capacidad Utilizada (Asociada al costo de operación [— Esperanza])



## Parte VI

# Referencias

Meignan. **Simulation and Evaluation of Urban Bus Networks using a Multiagent approach**. Elsevier-France,2007.

Torres. **Line planning on tree networks with applications to the Quito Trolebus System**. International transactions in operational Research, 2010.

Boyd. **Convex Optimization**. Cambridge University Press,2004.

Arampatzis. **A GIS based decision support system for planning urban transportation policies**. European Journal of Operational Research ,2002.

Kliwer. **A time-space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling**. European Journal of Operational Research ,2005.

Mes. **Comparison of agent-based scheduling to look-ahead heuristic for real time transportation problems**. University of Twente-Netherlands, 2005.

Mitrovic-Minic. **Double-horizon based heuristic for the dynamic pickup and delivery problem with time windows**.Transportation Research, 2003.

Dell'Amico. **Heuristic Algorithms for Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem**. Management Science, 1993.

Freling. **Models and Algorithms for Single-Depot vehicle scheduling**. Rotterdam, 2001.

Yang. **On line algorithms for truck fleet assignment and scheduling under real-time information**. 78th Annual meeting of the Transportation Research Board, 1999.

Lucic. **Computing with bees: attacking complex transportation engineering problems**. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 2003.

Guihaire. **Transit Network Design and Scheduling: a Global Review**.Transportation research, 2008.

Murray. **A coverage model for improving public transit system accesibility and expanding access**. Annals of operational research, 2003.

Bussieck. **Discrete optimization in public rail transport**. Mathematical Programming, 1997.

Changsan. **Optimizing public transit quality and system access: the multiple route, maximal covering/shortest-path problem.** Environment and Planning B: Planning and Design, 2005.