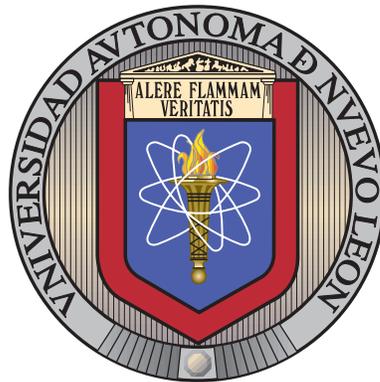


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MODELO MATEMÁTICO E IMPLEMENTACIÓN DE
UN SIMULADOR BASADO EN UN SISTEMA DE
TRANSPORTE URBANO

POR

CITLALI MARYURI OLVERA TOSCANO

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

AGOSTO 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MODELO MATEMÁTICO E IMPLEMENTACIÓN DE
UN SIMULADOR BASADO EN UN SISTEMA DE
TRANSPORTE URBANO

POR

CITLALI MARYURI OLVERA TOSCANO

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

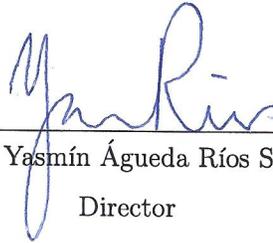
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

AGOSTO 2018

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Modelo matemático e implementación de un simulador basado en un sistema de transporte urbano», realizada por la licenciada Citlali Maryuri Olvera Toscano, con número de matrícula 1880638, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis



Dra. Yasmín Águeda Ríos Solís
Director



Dr. Romeo Sánchez Nigenda
Revisor



Dr. Leonardo Gabriel Hernández Landa
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, agosto 2018

A mis padres
Elvira Toscano y
Aarón Olvera

A mis hermanas
Cristina Janice y
Cindy Miriam

A mi novio
Juan Pablo

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	2
1.2. Objetivo	3
1.3. Estructura de la Tesis	3
2. Antecedentes	4
2.1. Modelo Matemático	4
2.2. Simulación	6
2.3. Teoría de Colas	7
3. Simulación de un Sistema de Transporte	10
3.1. Amontonamiento de Camiones	10
3.2. Caso de Estudio	14
4. Revisión de Literatura	17

5. Metodología para Minimizar los Amontonamientos	21
5.1. Modelo del Amontonamiento de Camiones	21
5.2. Simulación	27
6. Resultados	33
7. Conclusiones y Trabajo a Futuro	43
7.1. Conclusiones	44
7.2. Trabajo a Futuro	45

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mis padres, Aarón Olvera Vanzzini y Elvira Toscano Campos. Ustedes son la mayor prueba de que con trabajo y esfuerzo todo se puede. Su apoyo incondicional y amor en cada etapa de mi vida fueron fundamentales para llegar hasta este momento. Jamás terminaré de agradecerles todos los sacrificios que han hecho por mí, cada uno de ellos me han transformado en la mujer que soy ahora. De ustedes es este éxito. Para ustedes es todo mi agradecimiento y mi admiración.

Agradezco a Cristina Janice Olvera Toscano y Cindy Miriam Olvera Toscano todo su apoyo, sinceridad y aprecio. Hermanas, me siento afortunada de poder contar con ustedes y saber que estarán allí cuando las necesite.

Juan Pablo Rosas Baldazo te ha tocado ver mi sol y mi tormenta y aún así sigues a mi lado dándome todo tu cariño, apoyo y comprensión. Estoy agradecida por tenerte en mi vida y estoy segura de que llegaremos lejos juntos. Te amo.

Agradezco infinitamente a mi tía Lorenza García y a la familia Assad - García. Ustedes me recibieron en su casa cuando era una desconocida y ahora soy parte de su familia. No saben cuánto afecto y gratitud tengo hacia ustedes.

Agradezco a todos mis compañeros y profesores del PISIS, especialmente a aquellos que se convirtieron en mis amigos. Gracias por pasar conmigo esta etapa de aprendizaje. Gracias por tantos consejos, muestras de cariño y apoyo. Sobre todo gracias por tantos momentos invaluables y divertidos.

Agradezco a Luis Alejandro Benavides Vazqu ez y a Eduardo Vald es García, ya que adem as de amigos fueron parte fundamental de este trabajo. Luis sin tu ayuda este trabajo hubiera sido interminable. Durante este proceso te ha tocado ser compañero, amigo, hermano y revisor. De manera no oficial te convertiste en el co-asesor de este trabajo. No tengo como agradecerte tanto apoyo. Lalo, durante toda la maestría fuiste la persona a la que recurría si tenía dudas, tu sinceridad y compa nerismo son impresionantes. He aprendido mucho de ustedes, los admiro y aprecio mucho.

Agradezco enormemente a la Dra. Yasmín Águeda Ríos Solís quien dirigió este trabajo. Gracias por su asesoría siempre dispuesta, por su inagotable entusiasmo, por todas sus enseñanzas, por brindarme su apoyo y sobre todo por su amistad.

Agradezco a mis revisores, el Dr. Romeo Sánchez Nigenda y el Dr. Leonardo Hernández Landa por sus valiosos comentarios, correcciones y contribuciones a este trabajo.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León y al Posgrado en ingeniería de Sistemas por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL por brindarme la beca de inscripción y ofrecerme sus instalaciones para realizar mis estudios de maestría.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por apoyarme económicamente con la beca de manutención que me permitió continuar con mis estudios de posgrado.

RESUMEN

Lic. Citlali Maryuri Olvera Toscano.

Candidata para el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

MODELO MATEMÁTICO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SIMULADOR BASADO EN UN SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO

Número de páginas: 56.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo de esta investigación es estudiar el problema de amontonamiento de camiones y realizar un modelo que logre capturar el comportamiento de un sistema de transporte urbano real.

La metodología de solución que proponemos consiste en una simulación que reproduce el trayecto recorrido de los camiones durante el día. Además, un modelo matemático de optimización combinatoria que nos permite hacer una planificación en tiempo real para mantener avances congruentes entre camiones consecutivos.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Las principales contribuciones de esta investigación son dos. La primera de ellas es la formulación de modelo matemático para el problema de amontonamiento de camiones, el cual comparado con otros modelos de la literatura logra disminuir la cantidad de variables necesarias. Además, de que el modelo es completamente lineal, considera la capacidad de los camiones, así como tasa de descenso y llegada promedio de usuarios en cada parada a diferencia de otros trabajos que hacen uso de matrices origen-destino.

La segunda contribución consiste en una simulación de eventos discretos de un sistema de transporte de tránsito rápido que estima los datos del estado del sistema en diferentes puntos del tiempo y la cual reproduce eficientemente los amontonamientos de camiones del problema real.

Firma del asesor: _____

Dra. Yasmín Águeda Ríos Solís

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En latinoamérica, México ocupa uno de los primeros lugares en donde la población que utiliza el transporte público destina mayor tiempo en sus traslados. Cada persona tarda en promedio ochenta y ocho minutos en trasladarse a sus trabajos o escuelas [27]. Para mitigar este problema, algunas ciudades de latinoamérica han implementado sistemas de transporte urbano eficientes que pretenden reducir el uso de vehículos particulares, impactando en una reducción de tráfico y por ende la contaminación al medio ambiente [26]. Sin embargo, en México el sistema de transporte público carece de buen servicio convirtiéndolo en un servicio poco atractivo a aquella parte de la población con vehículo particular [23]. Esta parte de la población, prefiere gastar más mediante el pago de la gasolina requerida por el vehículo para su traslado con el fin de invertir menor cantidad de tiempo hasta su destino. Por otra parte, los usuarios del transporte público, día con día, muestran inconformidad en el servicio, siendo una de las principales quejas el tiempo de espera del servicio (camión u otro medio de transporte) [20]. En la literatura, a los usuarios se les llama *pasajeros* o *personas*. Existen diferentes sistemas de transporte público tales como el metro o camión. En este trabajo nos enfocamos en el transporte mediante el uso de camiones. Este sistema funciona siguiendo un esquema de paradas ubicadas estratégicamente para cumplir con la demanda de usuarios.

Generalmente, los horarios preestablecidos de llegada para los camiones a las paradas no son respetados debido a la dinámica del día, como el tráfico, la lluvia y los accidentes. Cuando un camión está retrasado a su horario establecido, comúnmente

encuentra más usuarios de lo habitual, ya que se contemplan aquellos que se encontrarían en el horario establecido más aquellos que llegan después de ese horario. Por el contrario, si el camión se adelanta a su horario establecido, la cantidad de usuarios es menor a la habitual. Una de las causas principales de la existencia de adelantos o atrasos en los horarios se presenta cuando dos camiones se encuentran a una distancia que se considera cercana, a esta causa se le conoce como un *amontonamiento de camiones* [9, 16]. Esta causa es una de las quejas más frecuentes entre los usuarios de transporte público, debido a que afecta directamente con su tiempo de espera [26].

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo e implementación de una simulación de un sistema de transporte urbano. Específicamente, nos centramos en la Ecovía, un *sistema de transporte colectivo* del área metropolitana de la ciudad de Monterrey en el estado de Nuevo León en México. La simulación reproduce el *trayecto* (camino señalado para ser recorrido) de los camiones durante el transcurso de un día laboral. Además, se realiza un modelo matemático cuya solución toma en cuenta las características de los sistemas de transporte para determinar los horarios de salida para cada camión en cada parada. También, permite generar un plan de acción en tiempo real al presentarse cualquier cambio en los horarios originales ocasionado por alguna contingencia basándose en la disminución del amontonamiento de camiones.

1.1 HIPÓTESIS

El problema de agrupamiento de camiones de un sistema de transporte urbano puede ser representado mediante una simulación, además de una modelación matemática cuya función objetivo sea el de disminuir el amontonamiento de camiones en un periodo de tiempo establecido.

1.2 OBJETIVO

Implementar una simulación que sea capaz de capturar las propiedades principales de un corredor de camiones de un sistema de transporte urbano en tiempo real. Así mismo, presentar un modelo matemático que permita disminuir el problema de amontonamiento de camiones.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El resto de la tesis se encuentra organizada de la siguiente manera: en el capítulo 2 se presentan los conceptos necesarios para entender la metodología utilizada en esta tesis, como lo son el modelo matemático, la simulación y el proceso de Poisson. El problema central de esta tesis el cual es el amontonamiento de camiones así como el caso de estudio, la Ecovía, son presentados en el capítulo 3. En el capítulo 4 se realiza una revisión de la literatura relacionada con el problema presentado de la tesis, que involucra una diversidad de investigaciones que hacen uso de modelos cuadráticos y lineales para los enfoques en tiempo real y diferentes estructuras para la simulación. El capítulo 5, muestra la formulación del modelo matemático propuesta y las características de la simulación realizada. En el capítulo 6, se muestra la validación de la simulación, así como algunos resultados preliminares de la misma. Finalmente, en el capítulo 7 se concluye el presente trabajo y se ofrecen algunas guías para trabajo a futuro.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

La metodología utilizada para dar solución al problema del amontonamiento de camiones se basa en la formulación de un modelo matemático y la implementación de una simulación de un corredor de camiones. En ambos casos se considera que la llegada de usuarios a las paradas siguen un comportamiento tipo Poisson. En el presente capítulo se definirán estos conceptos, los cuales serán utilizados en los capítulos 5 y 6.

2.1 MODELO MATEMÁTICO

Un *modelo matemático* permite representar un sistema, bajo ciertas simplificaciones, utilizando conceptos, lenguaje y simbología de las matemáticas. Los modelos matemáticos son de gran utilidad por su facilidad para capturar fenómenos que abarcan desde los más simples (como el lanzamiento de una moneda) hasta los más complejos (como la propagación del cancer en un organismo), por tal motivo su uso en áreas de ingeniería y ciencia ha ganado importancia [43].

Algunas de las ventajas de la construcción de modelos matemáticos es la posibilidad de obtener propiedades, características y relaciones dentro del fenómeno de estudio que no son evidentes a simple vista. Además, permite estudiar las consecuencias de situaciones con un costo económico relativamente bajo y sin riesgos para situaciones en las que no es conveniente experimentar con el mundo real, como situaciones médicas o de desastre natural [31].

Los modelos matemáticos se pueden clasificar de distintas maneras. En base a la función del modelo, este se puede categorizar como: *modelo de optimización*, basado en técnicas de programación matemática, cuyo objetivo es determinar un *óptimo* del problema, es decir, de todas las posibles soluciones, encontrar la mejor; *modelo evolutivo*, dependiendo de *árboles de decisión* (mapa de los posibles resultados de una serie de decisiones relacionadas) para medir las diferentes opciones y sus resultados, y así encontrar la mejor opción; o *modelo predictivo*, basado en técnicas estadísticas y econométricas, con la finalidad de predecir el comportamiento de la *variable* (cantidad susceptible de tomar distintos valores numéricos dentro de un conjunto específico de números) en un futuro [42].

Por otro lado, con base a la realidad que se quiere modelar podemos encontrar otra clasificación: *modelo determinista*, se conocen con absoluta certeza todos los datos del problema, es decir, los datos de todo el sistema permanecen sin modificación alguna, mientras que cuando los datos no permanecen constantes se considera *modelo estocástico*.

En esta tesis es de interés los *modelos de optimización lineales*.

Bazaraa y Jarvis [6] definen un *problema de programación lineal* como aquel problema con una *función objetivo lineal* (función polinómica de primer grado), de minimización o maximización, que contiene restricciones lineales de igualdad y/o desigualdad. La representación del modelo en lenguaje matemático es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar} \quad & c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n, \\
 \text{sujeto a} \quad & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \leq b_1, \\
 & a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \leq b_2, \\
 & \vdots \\
 & a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n \leq b_m, \\
 & x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

En el modelo (2.1), la función objetivo a minimizar se define como $c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n$. Los coeficientes c_1, c_2, \dots, c_n se denominan *coeficientes de costo*, depen-

diendo del problema a modelar, éste puede cambiar de definición. Las variables x_1, x_2, \dots, x_n son variables de decisión que se encuentran al resolver el modelo. La desigualdad $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i$ denota la i -ésima restricción, normalmente las b_i representan el recurso disponible. Se le conoce como *solución factible* al conjunto de variables x_1, x_2, \dots, x_n que satisfacen todas las restricciones, es decir, al sustituir sus valores en cada restricción se cumple la desigualdad establecida. El conjunto de todas las soluciones factibles constituye la *región factible* o *espacio factible*. Si todas las variables de decisión x_j deben de tomar valores enteros se dice que el problema es un *problema lineal entero*. Cuando las variables de decisión x_j pueden tomar valores enteros o continuos se dice que es un *problema lineal entero mixto*.

En el capítulo 5 de esta tesis se presenta un modelo de programación lineal para minimizar los amontonamientos en un sistema de transporte. Más detalles acerca de los modelos matemáticos pueden verse en [43], [11], [36] y [25].

2.2 SIMULACIÓN

La palabra *simulación* es usada en la actualidad dentro del ámbito científico y del práctico; sin embargo, sus inicios se remontan a la segunda guerra mundial [33]. La simulación es la imitación de la operación de un proceso o sistema del mundo real [28]. El acto de simular algo primero requiere que se desarrolle un modelo; este modelo representa las características, comportamientos y funciones clave del sistema o proceso físico o abstracto seleccionado. El modelo representa el sistema en sí, mientras que la simulación representa el funcionamiento del sistema a lo largo del tiempo. Además, es una herramienta competente para el análisis, diseño y operación de procesos o sistemas complejos [34].

Para realizar una simulación se requiere del uso de una herramienta computacional, por esta razón, si se desea capturar el comportamiento de un sistema que involucra gran cantidad de entidades, los tiempos de computo se incrementan dificultando la solución cuando el sistema crece en tamaño [32].

Actualmente, la simulación ha ganado popularidad debido al desarrollo y evolución del hardware y software. Además, tiene diversas áreas de aplicación en las cuales ha demostrado ser una herramienta útil, como lo son el análisis financiero, los sistemas de líneas de espera, los sistemas de producción, la evaluación de tácticas militares y el diseño de sistemas de comunicación, entre otras [10].

Los procedimientos y protocolos para la verificación y validación de modelos son un campo continuo de estudio académico, refinamiento, investigación y desarrollo en tecnología o práctica de simulaciones, particularmente en el campo de la simulación por computadora.

La *simulación de eventos discretos* es una simulación donde el tiempo evoluciona a lo largo de eventos que representan momentos críticos, mientras que los valores de las variables no son relevantes entre dos de ellos o resultan triviales para ser computados en caso de necesidad [28]. Más detalles acerca de las simulaciones de eventos discretos los podemos encontrar en los siguientes libros [3], [21] y [46].

En esta tesis, en el capítulo 5 presentamos una simulación de eventos discretos de un sistema de transporte urbano que logra modelar dicho sistema de manera cercana a la realidad. Los temas fundamentales en la simulación incluyen la adquisición de información de origen válida sobre la selección relevante de características y comportamientos clave, el uso de aproximaciones y suposiciones simplificantes dentro de la simulación, además de la fidelidad y validez de los resultados de la misma. En la sección 5.2 veremos cada una de estas etapas en detalle para un sistema de transporte Ecovía.

2.3 TEORÍA DE COLAS

La rama de la matemáticas que describe y calcula la probabilidad de que un evento suceda es la llamada *teoría de la probabilidad*. Está se expresa como un número entre cero y uno la ocurrencia de un evento, donde cero significa que el evento es

imposible que suceda y uno significa que el evento va a ocurrir indudablemente [38]. Para ejemplificar lo anterior se presenta el siguiente caso, el lanzamiento de una moneda, donde los posibles resultados son cara o cruz. La probabilidad de que al lanzar una moneda se obtenga un resultado cara o cruz, es igual a uno, porque no hay más opciones. Una probabilidad igual a 0.5 implica que un evento es igualmente probable que ocurra; siguiendo con el ejemplo de lanzar una moneda, la probabilidad de que el resultado sea cara es 0.5; por otro lado la probabilidad de que el resultado sea cruz es igual de probable que el resultado de cara. Ahora bien, la probabilidad de que el resultado del lanzamiento sea distinto de cara o cruz es cero, ya que es imposible que suceda por que la moneda solo tiene dos lados.

En el lanzamiento de una moneda, el cálculo de la probabilidad es sencilla, porque los resultados son *mútuamente excluyentes*: solo puede ocurrir un evento a la vez, cara o cruz. Además, cada lanzamiento de moneda es un *evento independiente*: el resultado de un lanzamiento no depende del lanzamiento anterior. Sin importar la cantidad de resultados idénticos en diferentes eventos consecutivos, la probabilidad del resultado del siguiente lanzamiento es siempre 0.5.

En el modelo matemático y en la simulación presentados en el capítulo 5 se considera que los usuarios del transporte llegan a una parada siguiendo un comportamiento tipo *Poisson*. Dicho comportamiento se describe a continuación.

Los experimentos en los cuales es de interés contar el número de veces que ocurre un cierto fenómeno (*éxitos*) durante un periodo de tiempo o una región del espacio fija se dice que siguen un comportamiento tipo *Poisson*. Algunos ejemplos de este tipo de experimentos son: el número de defectos en un metro de tela, el número de visitantes diarios en un museo, o el número de llamadas recibidas en una hora [40]. Dichos experimentos deben cumplir además, las siguientes condiciones:

- El número de éxitos que ocurren en cada región, del tiempo o del espacio, es independiente de lo que ocurra en cualquier otro tiempo o espacio previos.
- La probabilidad de un éxito en un tiempo o espacio pequeño es proporcional

al tamaño de éste, y no depende de los eventos fuera de él.

- La probabilidad de encontrar uno o más éxitos en una región del espacio o tiempo tiende a cero a medida que se reducen las dimensiones de la región de estudio.

La función de probabilidad que presenta la distribución de Poisson es la siguiente:

$$f(x) = P(X = x) = \begin{cases} \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}, & \text{si } x \in \mathbb{N} \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Donde la λ es el promedio de ocurrencias del fenómeno en la región del espacio o tiempo fija. De esta manera, la media es $\mu = \lambda$ y la varianza, $\sigma^2 = \lambda$.

En teoría de colas, el proceso de Poisson es uno de los modelos más usados e importantes, ya que con frecuencia el proceso de llegada de clientes a un establecimiento puede ser descrita por este proceso [30]. En esta tesis, es relevante el proceso de Poisson ya que se utiliza para describir la cantidad de usuarios que llegan a una parada. Sin embargo, hay situaciones en las que la llegada de usuarios se puede describir mediante una distribución normal o incluso con lognormal, más detalles se pueden ver en [39].

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE

En el presente capítulo se definirán los conceptos utilizados para comprender la terminología usada en los capítulos posteriores, así como la formulación del problema de estudio. Además, se mencionan conceptos para entender la simulación propuesta que captura el comportamiento de un sistema de transporte urbano.

3.1 AMONTONAMIENTO DE CAMIONES

Un *corredor de camión* es una sección de carretera o carreteras contiguas a las cuales da servicio una línea de camión o múltiples líneas de camiones y que tiene carriles exclusivos para los camiones.

En un entorno estocástico, los horarios preestablecidos de llegada para los camiones a las paradas no son respetados. Los horarios en general no se cumplen por la dinámica del día, siendo una de las causas principales los accidentes viales que impiden el paso durante el recorrido de los camiones. Otra causa, es la limitante de velocidad de cada camión debido al tráfico generado en la ciudad. Otra causa posible es el tiempo de ascenso y descenso de los usuarios del camión, a mayor cantidad de usuarios la estadía en parada se incrementa.

Cuando un camión está retrasado con respecto a su horario planeado de llegada



Figura 3.1: Un agrupamiento de cuatro camiones en el sistema de transporte Ecovía.

a una parada, generalmente, hay mayor cantidad de usuarios con respecto al habitual (los del horario establecido más aquellos usuarios que llegaron entre ese horario y la llegada del camión). Por el contrario, si el camión se adelanta a su horario establecido, la cantidad de usuarios en la parada es menor a la habitual. En el momento en que dos camiones se encuentran en una misma parada o lugar del recorrido en el mismo instante de tiempo, ocurre un *amontonamiento de camiones*. La figura 3.1 muestra una visualización de la ocurrencia de un amontonamiento de camiones en un sistema de transporte colectivo.

La distancia, en tiempo, entre dos camiones consecutivos se le denomina *avance*. Si dos camiones tienen un avance muy grande o muy pequeño, pueden provocar un amontonamiento de camiones. La figura 3.2 muestra el avance entre los camiones k y $k + 1$.

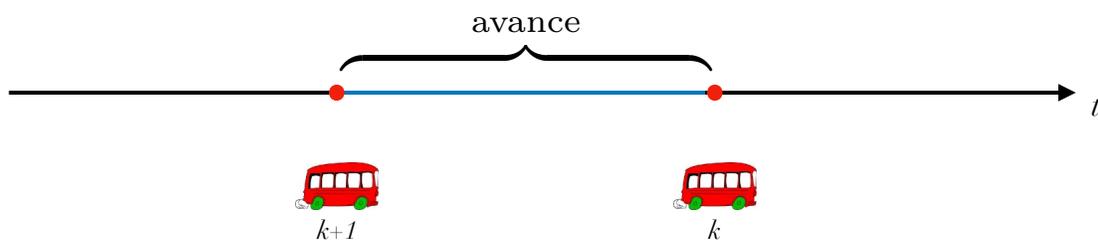


Figura 3.2: Avance entre dos camiones, k y $k + 1$.

El amontonamiento de camiones aumenta los tiempos de espera promedio de los usuarios, empeora la distribución promedio de usuarios en las paradas, y desde el punto de vista del usuario la calidad del servicio es mala [35]. Por lo tanto, es importante que las *agencias de transporte público* (empresas que se dedican a la transportación de usuarios en un país o región del mismo) identifiquen y entiendan las causas amontonamiento de camiones. Generalmente, esta condición se debe a una deficiente programación de horarios en lugar de una deficiente operación [20].

Algunas de las causas principales del amontonamiento de camiones son: tiempo de viaje entre dos paradas, mayor o menor, al establecido; salida, anticipada o retrasada, de un camión en una parada o en el depósito; y carga de usuarios, alta o baja en una parada. La figura 3.3 muestra algunas de las causas principales del amontonamiento de camiones para una sola *línea de camión*. Para ejemplificar las causas se utilizan tres camiones, azul, magenta y amarillo, que tienen un horario de salida de 6:00 a.m., 6:10 a.m. y 6:20 a.m., respectivamente. Para las cuatro figuras de la figura 3.3, el tiempo se representa en el eje horizontal, y las paradas de la línea en el eje vertical. La línea punteada simboliza el horario establecido, mientras que las líneas continuas representan el horario real. La figura 3.3 a representa la planificación determinística. Las líneas entre los viajes son equidistantes, teniendo avances de diez minutos. La figura 3.3 b muestra las perturbaciones que surgen cuando el segundo camión (magenta) tarda mayor tiempo de lo establecido en el trayecto de la parada 1 a la parada 2, esto puede ser causado por algún inconveniente (tráfico, accidente, etcétera). Como el segundo camión tiene un retardo al llegar a la parada 2, la cantidad de usuarios es mayor a la esperada si hubiera llegado en su horario establecido. Cuando el tercer camión (línea amarilla) llega a la parada 2, la mayoría de los usuarios ya subieron al segundo camión (línea magenta), por lo que hay menor cantidad de usuarios en la parada 2. Luego, estos dos camiones se amontonan en una parada j . La figura 3.3 c representa la situación cuando la hora de salida de un camión se anticipa a la hora establecida. De manera similar al segundo caso (véase figura 3.3 b), hay menor cantidad de usuarios en la parada 1, por lo que el camión dura menor tiempo en las siguientes paradas provocando que el tiempo de viaje sea

menor al establecido y permite alcanzar al segundo camión (línea magenta) en una j . Finalmente, la figura 3.3 d considera el caso en el que gran cantidad de usuarios llegan a una parada, este puede ser el caso de la hora de salida de una escuela o evento (concierto, partido, etc.). Esta figura muestra que, dado que hay usuarios adicionales en la parada 2, el tiempo de permanencia del segundo camión (línea magenta) en la parada 2 es mayor. Para cuando el segundo (magenta) y el tercer (amarillo) camión lleguen a una parada j , se encontrarán en un amontonamiento de camiones.

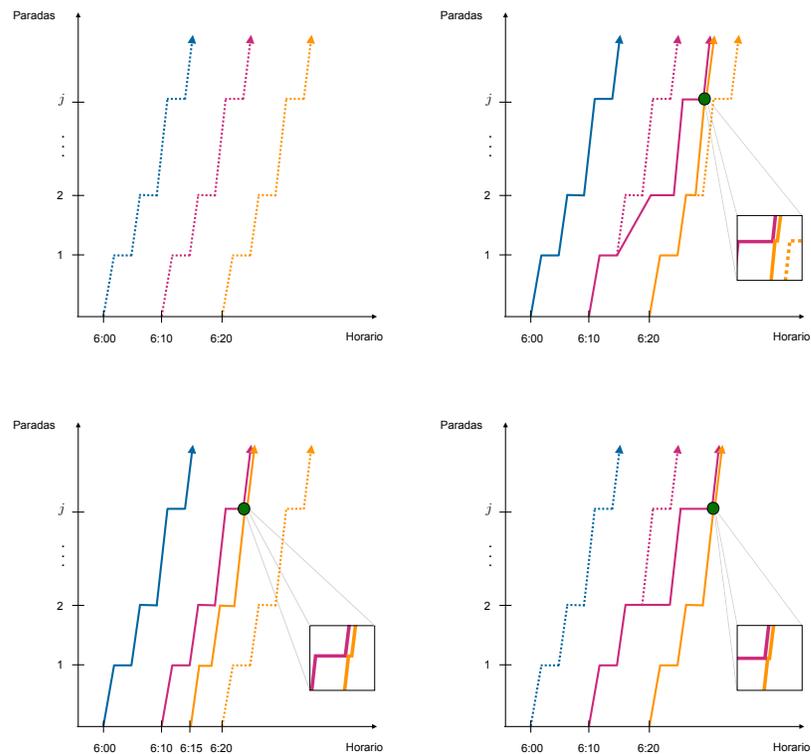


Figura 3.3: Causas principales del amontonamiento de camiones, modificado de [9].

Las agencias de transporte recopilan los datos operacionales de localización y conteo de usuarios en tiempo real mediante bases de datos. Los datos operacionales de los camiones pueden ayudar a las agencias de transporte a monitorear las mediciones de desempeño, evaluar estándares de servicio, identificar problemas potenciales, comprender las características del problema, proponer estrategias para mejorar la confiabilidad del servicio y desarrollar herramientas que ayuden a resolver los pro-

blemas que se pueden presentar.

3.2 CASO DE ESTUDIO

Un *sistema de camiones de tránsito rápido* (bus rapid transit, en inglés), es un sistema de transporte público colectivo con camiones. Estos sistemas están diseñados con servicios e infraestructura que mejoran el flujo de usuarios utilizando la velocidad y capacidad, de un tren ligero o metro, junto con la sencillez y flexibilidad del sistema de transporte con camiones. Entre algunas de las características principales de estos sistemas se incluyen corredores de camiones, paradas preestablecidas y espacio para acceso (ascenso y descenso) a los camiones a través de cada parada [2].

Un sistema de camiones de tránsito rápido tiene ciertas ventajas sobre lo demás sistemas de transporte público, por ejemplo, los camiones tienen mayor capacidad, el pago del servicio se realiza fuera del camión, se tiene un menor número de paradas, el ascenso y el descenso de una gran cantidad de usuarios en períodos cortos de tiempo, entre otras.

La Ecovía es un sistema de camiones de tránsito rápido que da servicio en la ciudad de Monterrey y su área metropolitana en el estado de Nuevo León en México. El sistema es utilizado por al rededor de 160 mil usuarios diariamente, dando servicio en un horario que inicia desde las 4:00 a.m. hasta las 12:00 a.m. El corredor de camiones cuenta con una sola línea y tiene una longitud aproximada de 30 kilómetros, en donde se encuentran ubicadas 39 estaciones intermedias más las dos terminales Lincoln y Valle Soleado [19]. La figura 3.4 presenta los nombres e íconos de las estaciones de la Ecovía. También, se puede observar en la figura 3.4 que las estaciones Mitras y Regina tienen un transbordo hacia el metro representado por una línea amarilla y una verde, respectivamente. Por otro lado, la figura 3.5 muestra la ubicación de cada una de las estaciones del corredor.

También, la Ecovía cuenta con un par de corridas especiales hacia las estacio-



Figura 3.4: Estaciones de la Ecovia. Imagen tomada de <http://ecovia.nl.gob.mx/estaciones>.

nes Mitras y Regina. En la estación Mitras, existen camiones que salen inician su recorrido en la estación Lincoln y lo terminan en la estación Mitras. Además, cada estación intermedia entre estas dos estaciones (Lincoln y Mitras) tiene un espacio reservado para el ascenso y descenso extra al del recorrido normal de los camiones. Por otro lado, para llegar a la estación Regina hay un recorrido que inicia en la estación Mitras y termina en la estación Regina, operando en un horario de 10:00 a.m. a 4:00 p.m.

La figura 3.6 muestra un grupo de usuarios esperando la llegada de un camión para abordarlo en la estación transito de la ecovia.

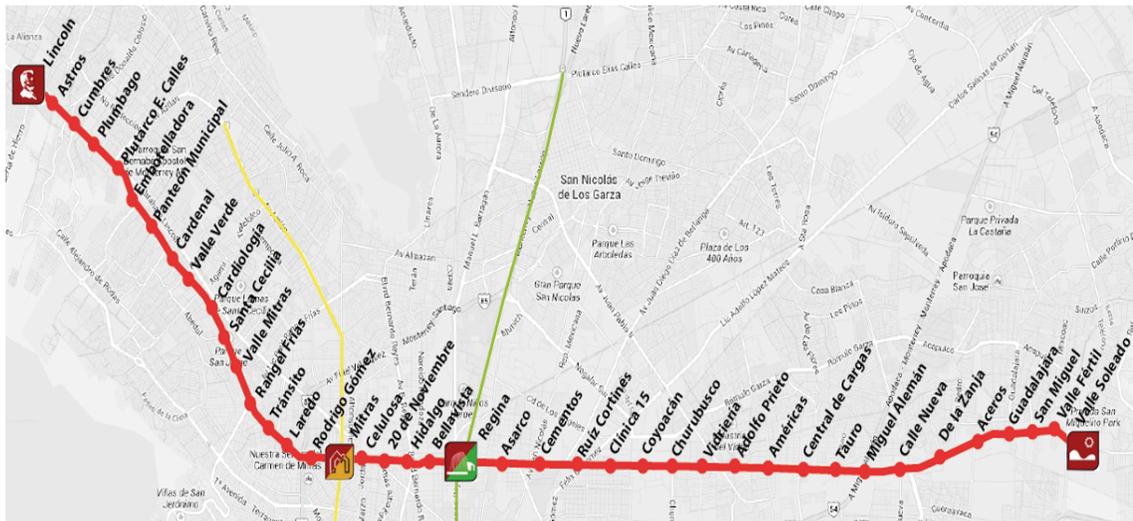


Figura 3.5: Mapa de localización de estaciones del sistema de transporte Ecovía. Imagen tomada de <http://mexico.itdp.org/noticias/ecovia-se-lleva-la-plata/>.



Figura 3.6: Usuarios esperando el turno para ascender o descender un camión en el sistema de transporte Ecovía.

CAPÍTULO 4

REVISIÓN DE LITERATURA

La gran mayoría de literatura de modelos matemáticos relacionada con operaciones de camiones en tiempo real utiliza funciones objetivo no lineales, así como también matrices *origen-destino* (una matriz que muestra el número de viajes que van desde cada origen hasta cada destino) para controlar la cantidad de usuarios que entran y salen en el sistema de transporte. Aunque Yang [45] afirma que una matriz de origen-destino es esencial para el eficiente control y gestión del tráfico. Hickman [24] establece que contar con los promedios de llegada de usuarios a cada paradas así como el porcentaje de descenso en las mismas proporciona resultados de calidad.

Zhao et al. [47] presentan un enfoque de control distribuido basado en la negociación *multiagente* (conjunto de entidades que interactúan entre sí). Las paradas y los camiones son representados mediante agentes con comunicación en tiempo real que logra una coordinación dinámica en la salida de cada camión para cada parada. Por otro lado, Eberlain et al. [18] formulan el problema de *retención* (dejar que un camión espere en una parada para reajustar los horarios) como un problema cuadrático determinista en un esquema de *horizonte móvil* (el camión tiene un intervalo de tiempo flexible en el cual puede llegar, no se limita a que llegue exactamente al horario establecido).

Otro problema de programación cuadrático es presentado por Sun y Hickman [41] donde su objetivo es minimizar la variación entre los horarios de salida de los camiones. El problema es resuelto mediante una heurística que descompone el problema general en subproblemas con solución óptima.

Un trabajo más cercano al nuestro es presentado por Ding y Chien [17], ellos consideran la minimización de la varianza total de los avances durante el recorrido entre los camiones para todas las paradas. Prueban el modelo usando una simulación en tiempo real de una ruta de tránsito de tren ligero de alta frecuencia en una ciudad de Nueva Jersey en Estados Unidos.

Daganzo [12] propone un esquema para determinar dinámicamente los tiempos de retención de los camiones durante su recorrido en cada parada utilizando su avance en tiempo real. Más tarde, Daganzo y Pilachowski [13] ajustan la velocidad de cruce de los camiones en base a un enfoque cooperativo *bidireccional* (colaborar en ambas direcciones para lograr un objetivo afín) que considera los avances de los camiones anteriores y posteriores.

Bartholdi y Eisenstein [5] abandonan la idea del cumplimiento con un horario y también cualquier avance a priori del objetivo, permitiendo que los avances se igualen automáticamente mediante la implementación de una regla de retención simple en una parada. El objetivo de los estudios mencionados anteriormente es mantener los avances progresivos entre los camiones por igual, por lo que no consideran los horarios donde los avances pueden ser diferentes para cada par de camiones y no son aptos para situaciones en que los camiones tienen una capacidad para llevar usuarios.

Cats et al. [8, 7] evalúan diferentes estrategias de control con tráfico reducido para mejorar la confiabilidad del servicio. Además, el desempeño del tránsito también se evalúa desde la perspectiva del operador, al considerar los impactos de las estrategias de mantenimiento en las operaciones de la flota y la gestión de los conductores. La evaluación se basa en un proceso de simulación y los resultados numéricos muestran que existen beneficios potenciales de implementar una estrategia de retención de evaluación que regula los avances dependiendo de los buses anteriores y siguientes.

Zolfaghari et al. [48] desarrollan un modelo matemático que utiliza información en tiempo real y se enfoca en minimizar el tiempo de espera de los usuarios en

cada parada teniendo en cuenta la varianza entre los horarios de salida. Puong y Wilson [37] realizan el desarrollo de un modelo entero mixto no lineal de respuesta de interrupción en tiempo real con énfasis en la estrategia de retención de trenes.

Delgado et al. [15, 16] proponen un modelo cuadrático para controlar camiones que operan en un corredor de transporte con el objetivo de minimizar los tiempos de espera totales experimentados por los usuarios en el sistema y con una flota *heterogénea* (diferentes capacidades) de camiones.

Otro enfoque basado en mantener estrategias para regularizar los avances es presentado por Xuan et al. [44]. El supuesto principal considerado es el de la disponibilidad de información entre pares de camiones. Los resultados de la investigación supera los métodos basados en los avances solo cuando los avances son regulados.

Abkowitz y Lepofsky [1] abordan una estrategia en tiempo real para minimizar el tiempo total de espera experimentado por los usuarios. Esta estrategia mantiene a los camiones en paradas específicas hasta que se alcanza un tiempo de avance mínimo. A partir de este trabajo se concluye que algunas características favorecen la implementación de estrategias de retención es la operación basada en la frecuencia y la aleatoriedad de las llegadas de usuarios.

Barnett [4] desarrolla un modelo de retención en una parada de control determinada, donde se minimiza la suma del tiempo de espera total más el retraso adicional de los usuarios a bordo. Fu y Yang [22] presentan una formulación que minimiza la variación de los avances para disminuir el tiempo promedio de espera experimentado por los usuarios en diferentes paradas. Sin embargo, no se consideran las limitaciones de la capacidad de los camiones. En tal caso, los resultados demuestran que la política óptima es emplear la detención en una sola parada.

En el presente trabajo, el modelo matemático tiene como objetivo mantener avances congruentes teniendo en cuenta la capacidad de los camiones. Comparado con el trabajo de Delgado et al. [16] nuestra propuesta reduce el número de variables en el modelo. El trabajo presentado en esta tesis se basa el trabajo de Hernández-

Landa et al. [23] realizando una reformulación del modelo además, de una nueva simulación de un sistema de transito rápido.

Gran parte de la literatura revisada utiliza una metodología que se ha vuelto popular en el área de investigación de operaciones. Esta metodología propone una nueva clase de algoritmos de optimización llamados *simheurísticos*, los cuales integran la simulación en un marco metaheurístico para resolver problemas de optimización combinatoria (más información en [29] y [14]). Una propuesta como trabajo futuro es realizar una simherística para el problema del amontonamiento de camiones como se ha hecho en los trabajos de Delgado et al. [16] y Hernández-Landa et al. [23].

CAPÍTULO 5

METODOLOGÍA PARA MINIMIZAR LOS AMONTONAMIENTOS EN UN SISTEMA DE TRÁNSITO RÁPIDO

Nuestra metodología consiste en un modelo matemático que proporcione y mantenga avances congruentes entre camiones consecutivos para evitar amontonamiento de camiones. El modelo tiene la capacidad de ejecutarse en el intervalo de tiempo requerido para tomar la decisión de cuáles camiones deben permanecer en las paradas para reajustar los horarios de salida y no amontonarse. Es necesario tener datos en tiempo real, por ello se implementa una simulación que estima los datos del estado del sistema en diferentes puntos del tiempo. Para construir el modelo y lograr que capture el comportamiento del sistema real se necesita información de cada camión (posición, usuarios a bordo y capacidad) y cada parada (cantidad de usuarios que esperan, porcentaje de descenso y tasa de llegada de usuarios), esta información se genera en la simulación y es posible guardarlo en un archivo.

5.1 MODELO DEL AMONTONAMIENTO DE CAMIONES

El problema de agrupamiento de camiones consiste en un conjunto K de camiones que tienen una capacidad c en un solo corredor que da servicio a un conjunto J de paradas. Cada camión k deja el depósito ($j = 0$) de acuerdo a un horario esta-

blecido y atiende a cada parada j del sistema. Cuando un camión k llega a la última parada $|J|$, todos los usuarios en el camión se bajan y el camión se regresa al depósito. El tiempo de viaje m_j entre dos paradas continuas ($j - 1$ y j) es determinístico durante todo el transcurso de la jornada.

Para cada parada j la llegada de los usuarios sigue una distribución de Poisson con una tasa de llegada. El tiempo de ascenso y descenso de usuarios es linealmente proporcional al número de usuarios que suben x_{kj} o bajan y_{kj} , respectivamente. La constante de proporcionalidad β indica el ascenso y la constante α indica el descenso. Se determina el número de usuarios a descender con una proporción de los usuarios que están en el camión \mathcal{Y}_j .

Para que un avance entre dos camiones contiguos sea *congruente*, se debe de encontrar en una ventana de tiempo (*intervalo de tiempo*) $[F_1, F_2]$ determinado por la *flexibilidad de tiempo* L que un camión puede adelantarse o retrasarse y la frecuencia de salida de los camiones del depósito ξ , llamado *cabecera*. Por ejemplo, si $\xi = 10$ minutos y $L = 20\%$ y si dos camiones tienen un avance entre $F_1 = 8$ y $F_2 = 12$ minutos (10 minutos menos el 20% y 10 minutos más el 20%) se dice que su avance es congruente. Los avances fuera de este intervalo implicarían un amontonamiento de camiones. La figura 5.1 muestra diferentes avances entre los camiones k y $k + 1$. La figura 5.1 a muestra al camión $k + 1$ dentro del intervalo $[F_1, F_2]$ por lo cual los camiones k y $k + 1$ tienen un avance congruente; sin embargo, para el caso de la figura b y c el camión se encuentra fuera del intervalo $[F_1, F_2]$ y por tanto su avance no es congruente. En la figura 5.1 b se muestra que los camiones k y $k + 1$ están alejados y en la figura 5.1 c están cercanos.

En el instante t_0 , donde las decisiones son tomadas, $s(k)$ representa la última parada que el camión k visitó. Si el camión k se encuentran en la parada j , entonces $s(k) = j$. La distancia, en unidades de tiempo, entre el camión k y la última parada visitada $s(k)$ es m_k^0 . Si el camión se encuentra en cualquier parada, entonces $m_k^0 = 0$. Para cada parada j , el número de usuarios esperando en la parada j en el instante t^0 es w_j^0 . La última parada $|J|$ no tiene usuarios esperando ($w_j^0 = 0$).

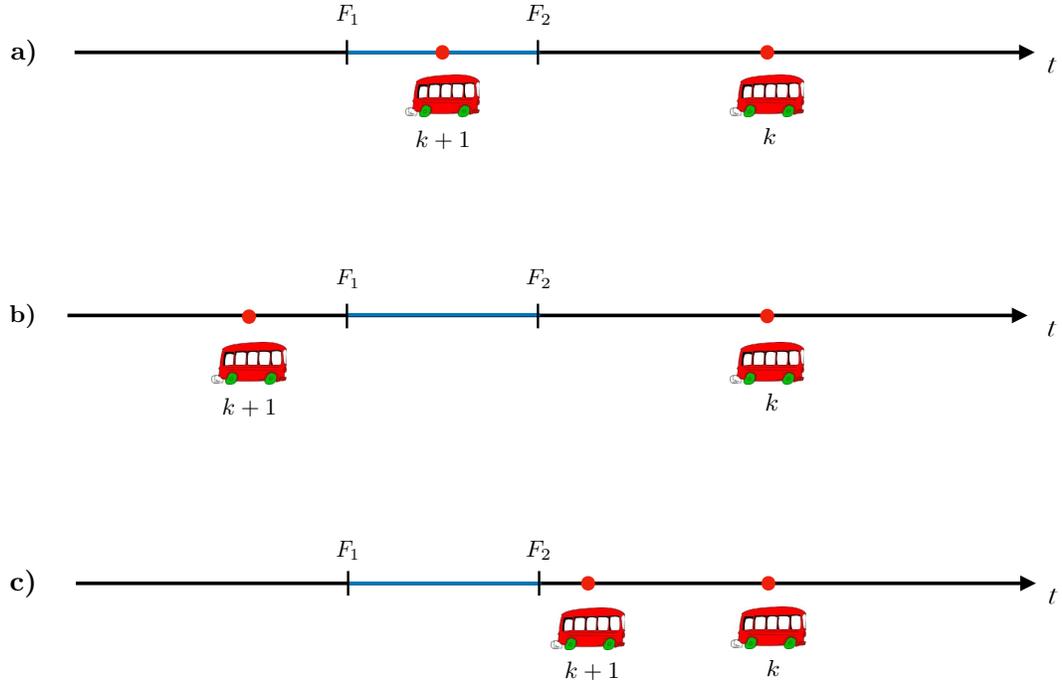


Figura 5.1: a) avance congruente entre los camiones k y $k+1$, b) y c) avance no congruente entre los camiones k y $k+1$.

Las variables de decisión del modelo son los tiempos de espera de los camiones en las paradas h_{kj} , esto es, el camión k debe esperar h_{kj} unidades de tiempo en la parada j . El horario de salida del camión k en la parada j es denotado por d_{kj} . Los horarios de salida de cada camión k en cada parada j son definidos en dos conjuntos diferentes de restricciones. La restricción (5.1) calcula el horario de salida del camión k en la parada j considerando su horario de salida en la parada anterior $d_{k,j-1}$, el tiempo m_j que tarda en llegar a la parada j , el tiempo de ascenso y descenso de usuarios y el tiempo que espera el camión en esa parada, para cada camión $k \in K$ y cada parada $j = s(k) + 2, \dots, |J| - 1$,

$$d_{kj} = d_{k,j-1} + m_j + \beta \cdot x_{kj} + \alpha \cdot y_{kj} + h_{kj}. \quad (5.1)$$

Similarmente, la restricción (5.2) determina los horarios de salida para cada

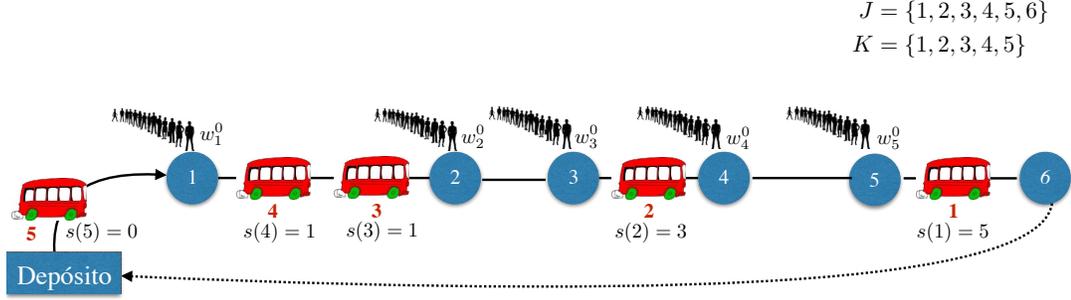


Figura 5.2: Ejemplo de corredor de tránsito con seis paradas y cinco camiones en un instante t^0 .

camión k que se encuentren entre las paradas $s(k)$ y $s(k) + 1$,

$$d_{ks(k)+1} = d_{ks(k)} + m_{s(k)+1} - m_k^0 + \beta \cdot x_{ks(k)+1} + \alpha \cdot y_{ks(k)+1} + h_{ks(k)+1}. \quad (5.2)$$

La restricción (5.3) acota el tiempo de espera del camión en la parada por un máximo δ para garantizar cierta calidad de tiempo de viaje de los usuarios, para cada camión k y para cada parada $j = s(k) + 1, \dots, |J|$,

$$h_{kj} \leq \delta. \quad (5.3)$$

La ecuación (5.4) calcula el número de usuarios en una parada j que quieren abordar el camión k . Esto corresponde al número de usuarios en espera w_j^0 , más los usuarios que llegaron (calculado mediante el proceso de Poisson durante el instante t^0) y el horario de salida del camión d_{kj} , menos los usuarios que abordaron los camiones previos y que pasaron por la parada j antes que el camión k , para cada camión k y para cada parada $j = s(k) + 1, \dots, |J| - 1$,

$$z_{kj} = w_j^0 + \lambda_j \cdot (d_{kj} - t^0) - \sum_{\substack{k'=0 \text{ tal que} \\ s(k') \geq s(k)}}^{k-1} x_{k'j}. \quad (5.4)$$

El número de usuarios que abordarán el camión k en la parada j esta delimitado por la cantidad de usuarios que esperan en la parada j y la capacidad del camión k . Si la cantidad de usuarios esperando es menor que la capacidad disponible en el camión, abordarán todos los usuarios, en caso contrario, abordarán solo los usuarios que no

sobrepasen la capacidad actual del camión (véase restricción (5.5)). En la restricción (5.5), se considera la existencia de camiones que salieron del depósito antes que el camión k y que aún no han llegado en a la parada j ,

$$\min \left\{ z_{kj} - \sum x_{k'j}, c - c_k^0 + \sum_{j'=s(k)+1}^j (y_{kj'} - x_{kj'}) \right\}. \quad (5.5)$$

Sin embargo, la restricción (5.5) no es linal. Se debe notar que tanto la capacidad y la cantidad de usuarios esperando el camión k están acotados, inferior y superiormente, como se muestra en las (5.6) y (5.7). El valor de M en la restricción (5.6) toma un valor suficientemente grande, que puede ser considerando como $2\lambda_j D$, donde D es la duración de la jornada laboral,

$$0 \leq z_{kj} - \sum x_{k'j} \leq M, \quad (5.6)$$

$$0 \leq c - c_k^0 + \sum_{j'=s(k)+1}^j (y_{kj'} - x_{kj'}) \leq c. \quad (5.7)$$

Con la finalidad de linealizar la restricción (5.5), se agregan la variables binarias r_{kj1} y r_{kj2} . El valor de r_{kj1} es igual a uno si $z_{kj} - \sum x_{k'j}$ es el mínimo valor y es igual cero en otro caso. Similarmente, r_{kj2} es igual a uno si $c - c_k^0 + \sum_{j'=s(k)+1}^j (y_{kj'} - x_{kj'})$ es el mínimo valor, de otra manera es igual a cero.

Considerando lo anterior, se puede linealizar la restricción (5.5) incorporando al modelo las restricciones (5.8),(5.9), (5.10), (5.11) y (5.12),

$$x_{kj} \leq z_{kj} - \sum x_{k'j}, \quad (5.8)$$

$$x_{kj} \leq c - c_k^0 + \sum_{j'=s(k)+1}^j (y_{kj'} - x_{kj'}), \quad (5.9)$$

$$x_{kj} \geq \left(z_{kj} - \sum x_{k'j} \right) - c(1 - r_{kj1}), \quad (5.10)$$

$$x_{kj} \geq \left(c - c_k^0 + \sum_{j'=s(k)+1}^j (y_{kj'} - x_{kj'}) \right) - M(1 - r_{kj2}), \quad (5.11)$$

$$r_{kj1} + r_{kj2} = 1. \quad (5.12)$$

La restricción (5.13) obtiene el número de usuarios que descienden en cada parada j , para $k \in K$ y $j = s(k) + 1, \dots, |J|$. Esto corresponde con el número de usuarios en el camión k multiplicado por el parámetro de descenso γ_j , se considera además, los usuarios que se estima que suban y bajen en paradas posteriores:

$$\mathbf{y}_{kj} = \gamma_j \cdot \left(c_k^0 + \sum_{j'=s(k)+1}^j (\mathbf{y}_{kj'} - \mathbf{x}_{kj'}) \right). \quad (5.13)$$

La restricción (5.14) garantiza que dos camiones no puedan adelantarse (característica de sistema de camiones de tránsito rápido) para cada camión $k \in K \setminus \{1\}$ y para cada parada $j = s(k-1), \dots, |J| - 1$

$$d_{kj} \geq d_{k-1j}. \quad (5.14)$$

Si el avance entre los camiones k y $k+1$ no es congruente, se define una penalización p_{kj} ,

$$p_{kj} = \begin{cases} -I_{kj} - \text{Tol}, & \text{si } I_{kj} < -\text{Tol} \\ I_{kj} - \text{Tol}, & \text{si } I_{kj} > \text{Tol} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5.15)$$

donde Tol representa el tiempo permitido que un camión k puede retrasarse o adelantarse, el cual depende del tiempo ξ en que sale un nuevo camión $k+1$ del depósito y el porcentaje de tolerancia L , de la siguiente manera $\text{Tol} = \xi L$. Por otro lado, el desfase del avance entre dos camiones consecutivos k y $k+1$ en la parada j es denotado por I_{kj} y se calcula de la siguiente manera $I_{kj} = d_{kj} - d_{k+1j} + \xi$. Incluyendo la definición anterior, la ecuación (5.15) se puede reescribir como:

$$\text{máx } \{|I_{kj}| - \text{Tol}, 0\}. \quad (5.16)$$

La figura 5.3 muestra los posibles valores de la penalización p_{kj} . Si el desfase del avance entre los camiones k y $k+1$ se encuentra dentro de la flexibilidad, entonces $p_{kj} = 0$. Por otra parte, se penalizará de manera lineal dependiendo la cercanía ($I_{kj} > \text{Tol}$) o la lejanía ($I_{kj} < -\text{Tol}$) entre los camiones k y $k+1$.

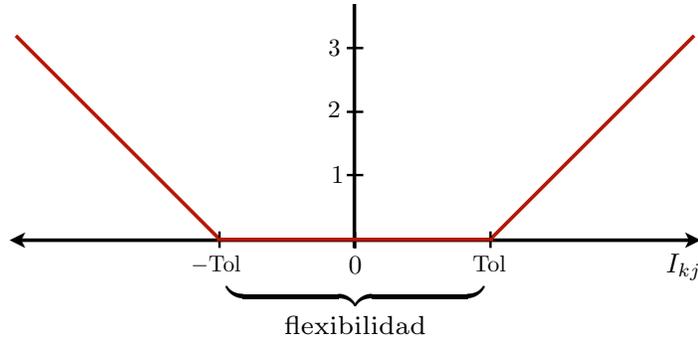


Figura 5.3: Visualización de penalización.

Como la definición de las penalizaciones p_{kj} no es una función lineal, se consideran lo siguientes conjuntos de restricciones:

$$R_{kj} \geq 0, \tag{5.17}$$

$$R_{kj} \geq -I_{kj} - \text{Tol}, \tag{5.18}$$

$$Q_{kj} \geq 0, \tag{5.19}$$

$$Q_{kj} \geq -I_{kj} - \text{Tol}. \tag{5.20}$$

Las restricciones (5.17) y (5.18) consideran el caso $I_{kj} < -\text{Tol}$, de manera similar, las restricciones (5.19) y (5.20) representan el caso $I_{kj} > \text{Tol}$.

Por último, la función objetivo (ver restricción (5.21)) es la minimización de las penalizaciones, en otras palabras, busca mantener avances congruentes entre camiones consecutivos.

$$\text{mín} \sum_{k=1}^{|K|-1} \sum_{j=1}^{|J|-1} (R_{kj} + Q_{kj}). \tag{5.21}$$

5.2 SIMULACIÓN

En la simulación que proponemos en esta tesis, el corredor incluye un *depósito* inicial desde el cual los camiones tienen salida a su recorrido y un depósito final donde

cada camión termina su recorrido. Cada t pasos un nuevo camión sale del depósito y se *activa* en el sistema. La primera vez que se realiza la generación de usuarios en una parada ocurre cuando el primer camión se encuentra en la parada anterior a la actual, a partir de este momento la generación de usuarios permanece activa en esa parada durante toda la simulación. En cada paso de la simulación y para cada parada j , los usuarios son generados con una distribución de Poisson con tasa λ_j de llegada. Cuando los usuarios llegan a una parada de camión, se registra la parada y hora de llegada. Cuando un camión k llega a una parada j , se realiza primero el descenso antes del ascenso de los usuarios en espera de la parada j . Los usuarios ascienden de acuerdo a la posición de llegada, es decir, ascienden aquellos usuarios que llegaron primero a la parada j . La primer ($j = 1$) y la última parada ($j = |J|$) del corredor tienen características diferentes de las demás paradas. En la primer parada, solo hay ascenso de usuarios y en la última parada, solo hay descenso de usuarios. Los camiones tienen *capacidad limitada*, es decir, en el camión ascenderán todos los usuarios que se encuentran esperando en la parada sin sobrepasar su capacidad disponible, los usuarios que no logren subir se quedarán esperando en la parada al siguiente camión. Un camión permanece en una parada las unidades de tiempo que requiere para ascender y descender usuarios agregando el tiempo de retención asignado.

La entrada para la simulación requiere de la cantidad de paradas de camiones en el corredor, la capacidad de los camiones, la tasa de llegada de usuarios en cada parada, la proporción de descenso de usuarios en cada parada, el tiempo de traslado entre dos paradas consecutivas, el tiempo que toma el descenso de una persona al camión, el tiempo que toma el ascenso de una persona del camión, el tiempo máximo que puede durar un camión en una parada, el tiempo para activar un camión y la duración de la simulación.

La salida de la simulación es la ubicación en el corredor de cada camión activo, el horario de llegada de cada camión a las paradas, los camiones activos en el sistema, la última parada visitada de cada camión activo, la cantidad de usuarios dentro de

los camiones activos, la cantidad de personas esperando en cada parada y el tiempo de espera del servicio de cada usuario.

La simulación se puede dividir en cuatro etapas: liberar camiones, generar usuarios, mover camiones y ascender y descender usuarios. En cada etapa se hace uso de tres estructuras principales del lenguaje de programación R llamadas *base de datos* (estructura que almacena diferentes tipos de datos en filas y columnas) `camiones`, `paradas` y `t.espera`.

La estructura `paradas` almacena la información referente a las paradas del corredor de camiones. Las filas representan las paradas. La primera columna representa el promedio de usuarios que llegan a la parada por unidad de tiempo. La segunda columna representa la tasa de descenso en la parada. La tercera columna representa la distancia, en unidades de tiempo, que tarda un camión en llegar desde una parada anterior hasta la parada de interés. Por último, la cuarta columna almacena la cantidad de usuarios en cada parada.

La estructura `camiones` almacena la información que está relacionada con cada camión. Las filas representan los camiones. Las primeras tres columnas representan la posición del camión, la capacidad actual del camión y el tiempo que se tiene que quedar retenido un camión en una parada, respectivamente. El resto de las columnas indican el *horario* (unidad de tiempo) de llegada del camión a cada una de las paradas.

Por otro lado, la estructura `t.espera` almacena la información de los usuarios en el sistema. Cada fila representa un usuario y las columnas indican el horario de llegada a la parada, el horario de ascenso al camión y en qué parada donde se encuentra.

El código de la simulación está estructurado mediante funciones basadas en cada una de las cuatro etapas del proceso. La función `liberarCamion` (ver algoritmo 1) libera un camión nuevo en el sistema si el paso de la simulación coincide con el horario de salida del siguiente camión del depósito (cabecera), esta información se

guarda en la estructura `camiones`.

Algorithm 1 `liberarCamion`

```

if mod(paso, cabeza) = 0 then
    Activar camión
    Actualizar la cantidad de camiones
end if

```

La manera de generar usuarios en el sistema se realiza mediante la función `generaPasaje` (ver algoritmo 2). Para cada parada, en cada paso, se genera una cantidad aleatoria de usuarios que sigue una distribución de Poisson con el parámetro λ_j asignado a la parada j . Después, la estructura `t.espera` se actualiza añadiendo una cantidad de filas igual a la cantidad de usuarios generados. En cada fila nueva, se añade el horario de llegada a la parada para cada usuario, así como de la parada en que llegaron.

Algorithm 2 `generaPasaje`

```

for cada parada  $j$  do
    Generar un número aleatorio de usuarios ( $\text{Poi}(\lambda_j)$ )
    Actualizar la cantidad de usuarios esperando
    Actualizar horario de llegada de usuarios
end for

```

La actualización de la posición de los camiones en el recorrido se realiza mediante la función `moverCamiones` (ver algoritmo 3). Cada camión activo avanza una posición en el recorrido siempre y cuando no este *estancado* (permanecer en espera en una parada), ya sea por el descenso o ascenso de usuarios, o por cumplir con el tiempo de retención. Cuando el camión avanza, la estructura `camiones` se actualiza incrementando la posición del camión en una unidad. Si el camión permanece estancado, en la columna de retención de la estructura `camiones` se decrementa una unidad.

La función `bajarSubir` (ver algoritmo 4) es la encargada del descenso y ascenso

Algorithm 3 moverCamiones

```
for cada camión activo  $c$  do  
    if  $c$  esta estancado then  
        Disminuir el tiempo de estancado del camión en una unidad  
    end if  
end for
```

de usuarios. Cuando un camión se encuentra en una parada, primero, se realiza el descenso de usuarios, que depende de la tasa de descenso en dicha parada. De esta manera, la cantidad de usuarios a descender es un porcentaje de los usuarios a bordo del camión. En la estructura `camiones`, se actualiza la capacidad del camión aumentando exactamente la cantidad de usuarios que descendieron. La cantidad de usuarios a abordar depende de la capacidad disponible en el camión. Si la capacidad disponible del camión es menor o igual a la cantidad de usuarios esperando en la parada, entonces todos los usuarios abordan el camión. En la estructura `camiones` se actualiza la capacidad del camión disminuyendo en la cantidad de usuarios que abordaron. Cuando la cantidad de usuarios esperando es mayor que la capacidad disponible en el camión, abordan solo los usuarios que no sobrepasen dicha capacidad. En la estructura `camiones` se actualiza la capacidad del camión a cero, impidiendo el ascenso de más usuarios. Siempre que los usuarios ascienden a un camión, la estructura `t.espera` almacena el horario de ascenso. El tiempo de ascenso y descenso de usuarios se registra en la estructura `camiones` reteniendo al camión en la parada.

Las estructuras y funciones que se han descrito anteriormente son la base de la simulación, el algoritmo 5 muestra la simulación de un corredor de camiones propuesta.

Algorithm 4 bajarSubir

```
for cada camión  $c$  do  
    if  $c$  esta en parada then  
        Baja usuarios  
        Actualiza capacidad del camión  
        Aborda usuarios  
        Actualiza capacidad del camión  
        Actualiza horario de salida de usuarios  
        Actualiza tiempo de retención del camión  
    end if  
end for
```

Algorithm 5 Simulación de un corredor de camiones

```
for cada paso do  
    liberarCamiones  
    generarPasaje  
end for  
for cada camión do  
    bajarSubir  
end for
```

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

El objetivo de la simulación es proporcionar los parámetros requeridos para analizar el comportamiento en tiempo real del sistema de transporte Ecovía. Como no se dispone de información real por parte de la compañía de transporte, se realizó un estudio de campo* para obtener los tiempos de ascenso y descenso promedio en hora pico para diferentes estaciones de la Ecovía. Los datos se registraron entre los horarios de 7:20 a.m. a 9:30 a.m. en diferentes días de la semana. La recopilación de datos se interrumpió debido a que las autoridades de la Ecovía no permitieron continuar con la actividad. Los datos faltantes fueron generados mediante supuestos basados en la información disponible. Los experimentos fueron ejecutados en una computadora iMac 14.3 con procesador Intel Core i7, velocidad 3.1 GHz y memoria de 16 GB. La simulación de un corredor de camiones de tránsito rápido se implementó en el lenguaje de programación R versión 3.4.1.

La simulación solo atiende el caso del periodo pico. Cada paso de la simulación es un minuto. La flota de camiones es homogénea y no se cuenta con un límite en la cantidad de camiones. Los camiones pasan por todas las paradas del corredor y no permite los adelantos entre camiones. No hay corridas especiales ni tampoco (para el caso de la Ecovía) se incluye la parada REGINA. A pesar que la Ecovía brinda un servicio bidireccional en el circuito Lincoln-Valle Soleado, en este trabajo solo se contempla un sentido siendo, el depósito inicial la parada Lincoln y el depósito final la parada Valle Soleado. Se considera además, que los tiempos de ascenso y descenso

*Agradezco a Francisco Gerardo Meza Fierro por su apoyo para la obtención de datos.

de usuarios son iguales.

Con el objetivo de evaluar el desempeño de la simulación se realizó una serie de experimentos que incluyen los parámetros (basados en el estudio de campo) que representan de manera más cercana el comportamiento de la Ecovía. Dichos parámetros son la capacidad de los camiones, igual a ochenta, la retención máxima de un camión en una parada igual a cinco minutos, el tiempo que se libera un camión del depósito (cabecera) igual cuatro minutos, tiempo de ascenso α y descenso β de usuarios igual 0.07 minutos por usuario, este tiempo incluye los tiempos en que los usuarios se estorban para ascender y descender (en literatura se puede encontrar con el nombre de tiempo de fricción). Para la experimentación se varió cada uno de esos parámetros dejando el resto fijo. Teniendo veinte replicas para cada caso. La tabla 6.1 muestra los valores que tomaron dichos parámetros. La primer columna indica los cinco diferentes valores de jornada en horas que se variaron, la segunda columna indica los cuatro valores de retención que se consideraron, la tercera, cuarta y quinta columna muestra los tres valores distintos para la cabecera, capacidad del camión y tiempo de ascenso α (descenso β) de usuarios al (del) camión por usuario, respectivamente. Los valores de la segunda, tercera y quinta columna están dados en minutos.

Jornada (hrs)	Retención (min)	Cabecera (min)	Capacidad	$\alpha = \beta$ (min)
1	3	2	80	0.05
2	5	4	100	0.07
4	7	6	150	0.1
6	10	–	–	–
8	–	–	–	–

Tabla 6.1: Valor de los parámetros de la simulación.

La contabilización de amontonamientos se hace por pares, es decir, si en una misma parada se encuentran dos camiones se considera un amontonamiento. Sin

embargo, si en la parada se encuentran tres camiones se contemplan dos amontonamientos. Los amontonamientos de camiones se pueden ver de manera gráfica en las figuras 6.1, 6.2 y 6.3, donde cada línea de color representa una camión, el eje horizontal representa el tiempo en minutos y el eje vertical las paradas. Se utilizaron los parámetros base variando únicamente el tiempo que le toma a los usuarios ascender (α) y descender (β) del camión. Como se puede observar en las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 los amontonamientos de camiones son más frecuentes hacia el final del recorrido. En la parada 22 o 23 es donde se concentra la mayor cantidad de gente y esto se asemeja al comportamiento real que es el comportamiento de la estación Mitras.

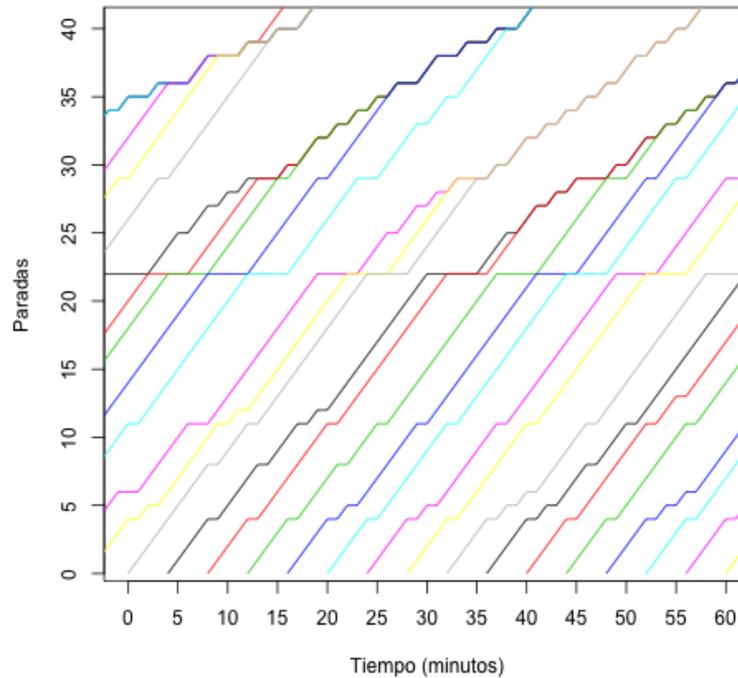


Figura 6.1: Corredor de camiones con valores $\alpha = \beta = 0.05$.

La figura 6.4 muestra el comportamiento entre amontonamientos y tiempo de espera promedio. Se puede observar que al rededor de 800 amontonamientos el tiempo de espera promedio es mucho menor al esperado. Sin tomar en cuenta este comportamiento, la relación entre la cantidad de amontonamientos y tiempo de

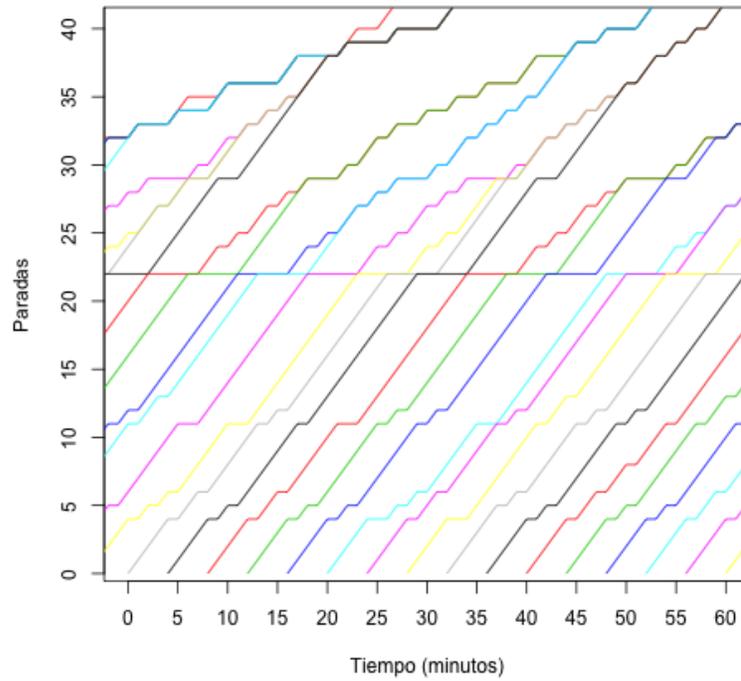


Figura 6.2: Corredor de camiones con valores $\alpha = \beta = 0.07$.

espera promedio tiene una tendencia lineal, en otras palabras, a mayor cantidad de amontonamientos mayor es el tiempo de espera promedio.

La figura 6.5 muestra la cantidad de amontonamientos respecto al valor de la jornada. La cantidad de amontonamientos incrementa conforme la jornada aumenta debido a que la simulación tiene una duración mayor y el número de amontonamientos es de esperarse que crezca durante este proceso. El incremento de los amontonamientos es proporcional creciente con respecto al aumento de la jornada.

El tiempo de salida del depósito (cabecera) se varía entre dos, cuatro y seis minutos. En la figura 6.6 se observa que la cantidad de amontonamientos es aproximadamente tres veces más cuando los camiones salen cada dos minutos del depósito comparado con la salida cada cuatro y seis minutos. Este comportamiento, es de esperar debido a que la frecuencia entre un camión y otro es corta, lo cual ocasiona

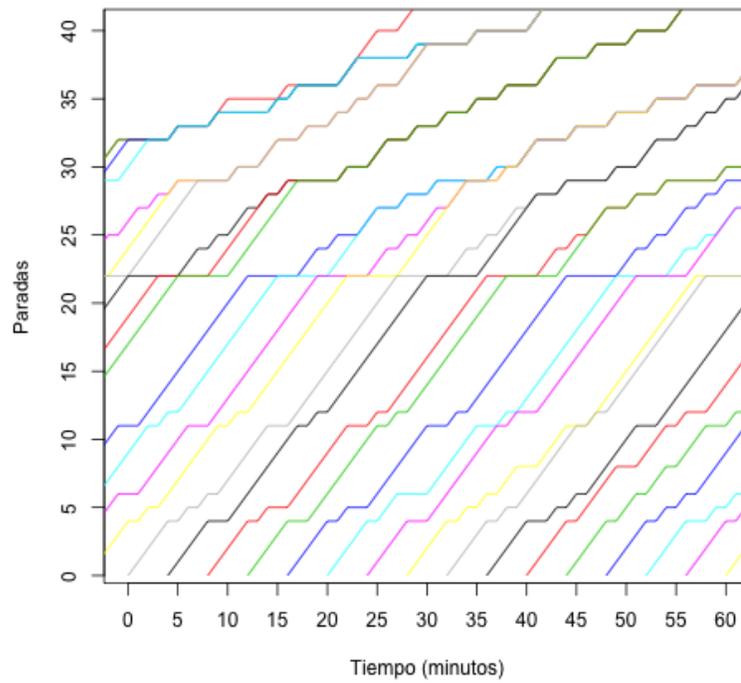


Figura 6.3: Corredor de camiones con valores $\alpha = \beta = 0.1$.

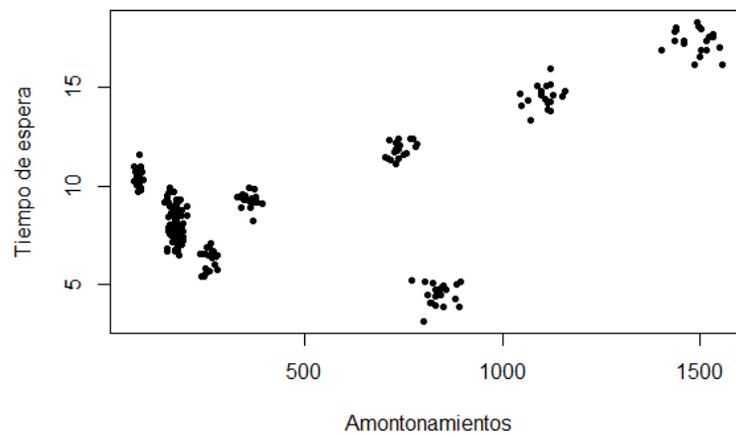


Figura 6.4: Tiempo de espera promedio respecto a la cantidad de amontonamientos.

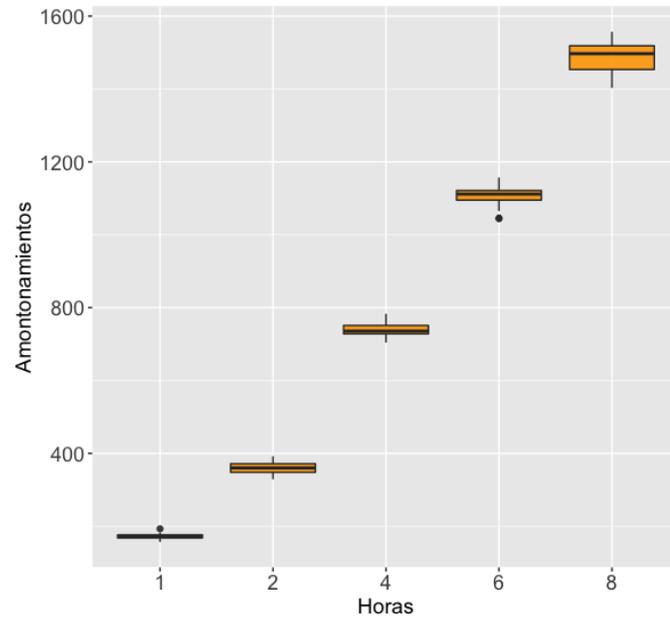


Figura 6.5: Cantidad de amontonamiento de camiones respecto a la duración de la jornada.

el amontonamiento de camiones en un periodo de tiempo corto.

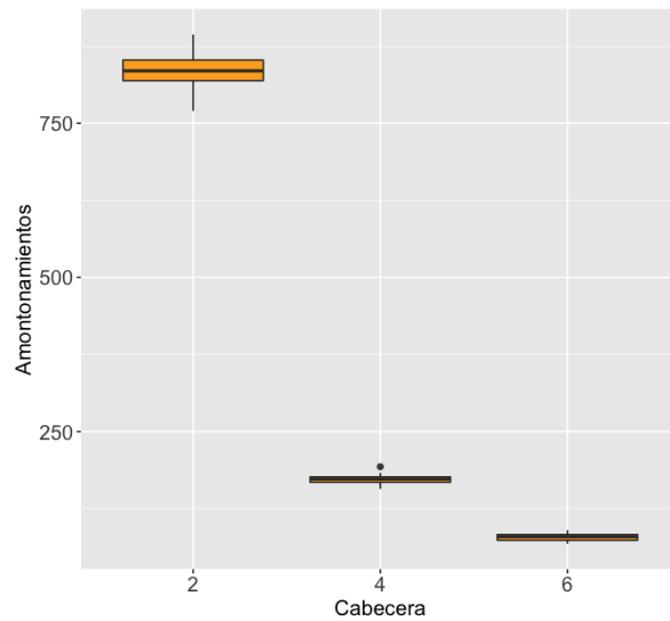


Figura 6.6: Cantidad de amontonamiento de camiones respecto a la frecuencia de salida de los camiones en el depósito.

La mayor cantidad de amontonamientos se presenta cuando la capacidad de los camiones se encuentra en 150, aproximadamente 250 amontonamientos. Si la capacidad se reduce a 80 o 100, la cantidad de amontonamientos es similar, la media está cerca de 175 amontonamientos. Ver figura 6.7.

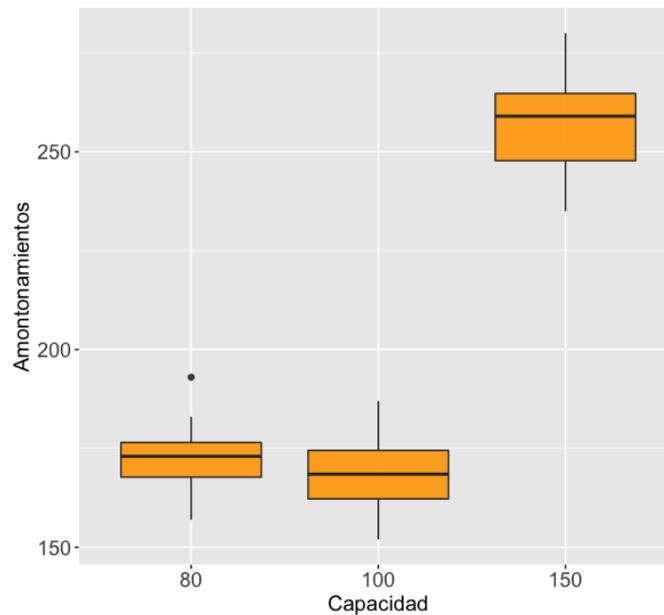


Figura 6.7: Cantidad de amontonamiento de camiones respecto a la capacidad máxima de usuarios del camión.

Al hacer variaciones al tiempo máximo de retención, la cantidad de amontonamientos se mantuvo entre 160 y 180. Este comportamiento es de esperarse ya que cuando se incrementa el tiempo de retención la cantidad de amontonamientos tiende a disminuir. El comportamiento mencionado se puede observar en la figura 6.8.

Analicemos ahora el tiempo de espera promedio variando los parámetros mencionados. La figura 6.9 muestra los tiempos de espera promedio cuando se varía el tiempo de cabecera. Se puede observar que el tiempo de espera es menor cuando la cabecera toma valor de dos minutos y es mayor cuando toma valor de seis minutos. Nuestra hipótesis de este comportamiento es que la frecuencia de llegada para los camiones es baja, por tal motivo el camión tarda más en llegar y por ende los usuarios

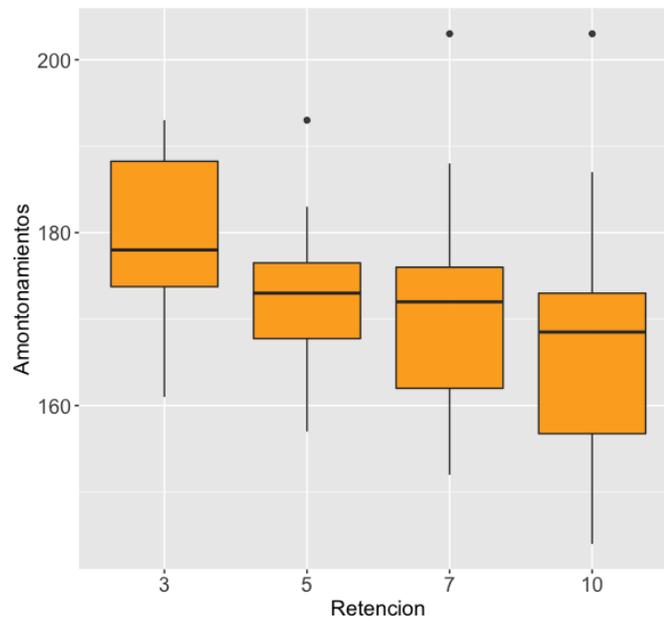


Figura 6.8: Cantidad de amontonamiento de camiones respecto a la duración máxima de un camión en una parada.

experimentan mayor tiempo de espera. Por otra parte, en la figura 6.10 se muestra un comportamiento contrario al variar la capacidad de los camiones, conforme se aumenta la capacidad se disminuye el tiempo de espera. Nuestra hipótesis de este comportamiento, es que cuando el camión tiene mayor capacidad, mayor cantidad de usuarios ascienden a los camiones provocando una disminución en las siguientes paradas donde se encuentre el camión. Finalmente, en la figura 6.11 se varía el tiempo de retención y se obtiene que el menor tiempo de espera promedio se presenta cuando la retención es de diez minutos.

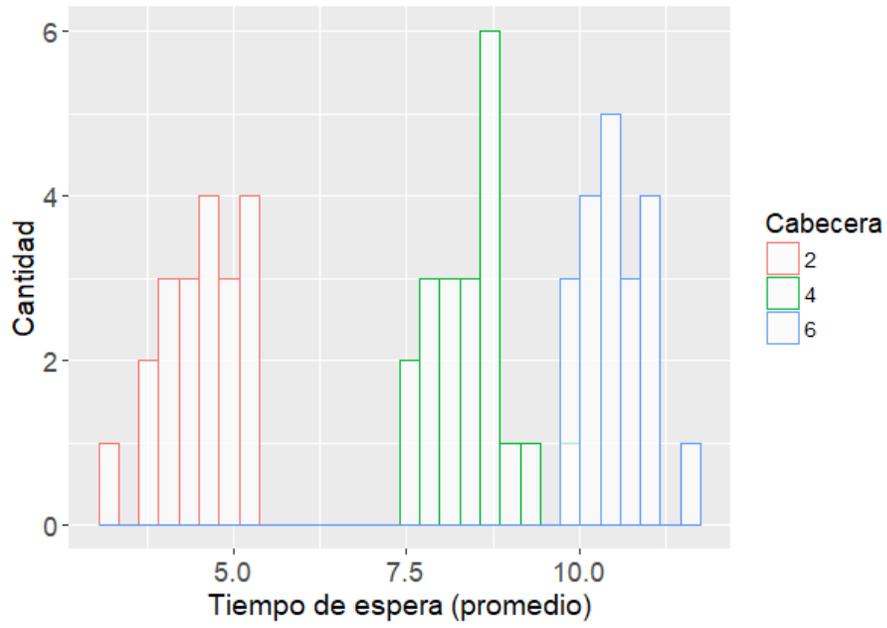


Figura 6.9: Tiempo de espera promedio respecto al tiempo de cabecera.

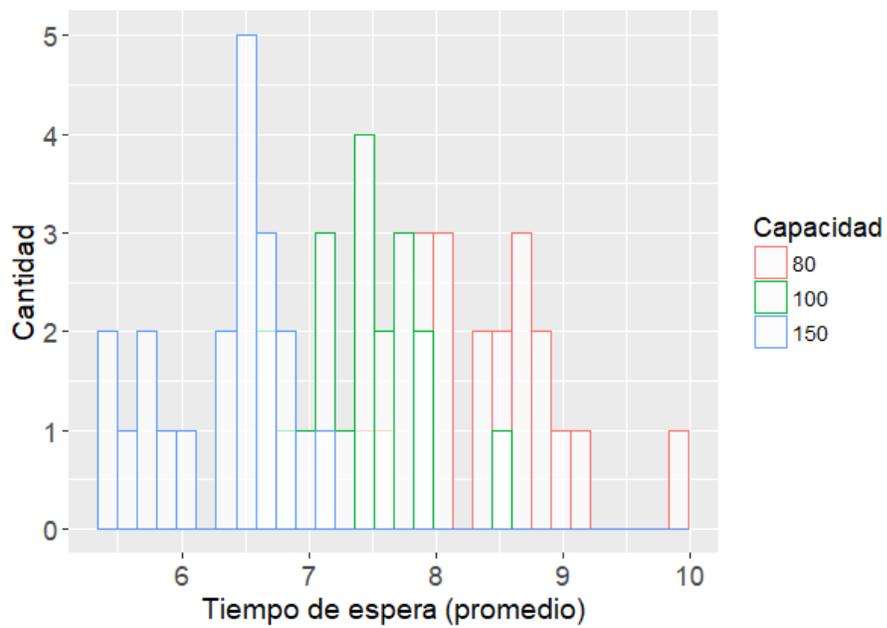


Figura 6.10: Tiempo de espera promedio respecto a la capacidad máxima de usuarios.

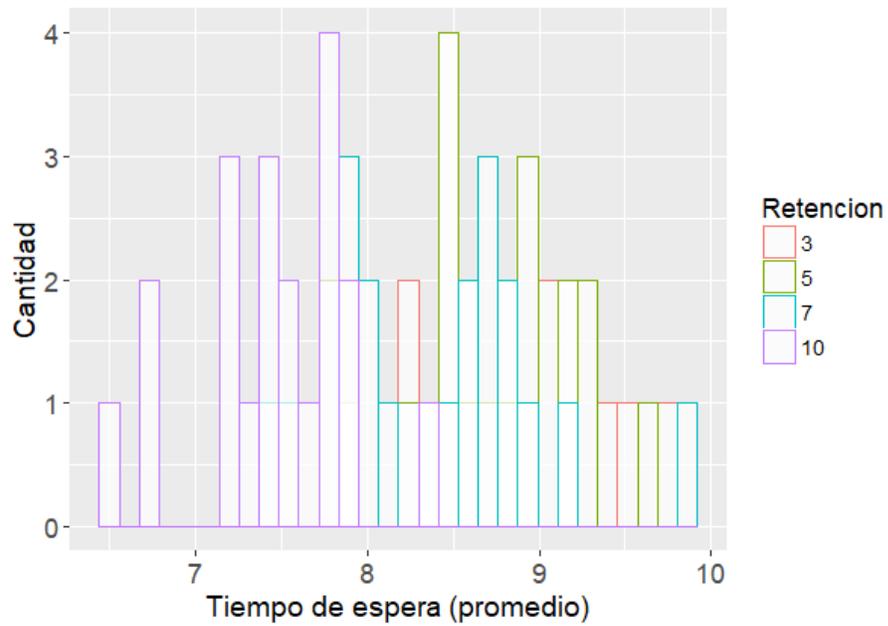


Figura 6.11: Tiempo de espera promedio respecto al tiempo máximo de retención del camión en una parada.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En el transporte urbano, una de las principales quejas es la espera excesiva de un camión. La queja por parte del usuario se incrementa al observar un amontonamiento de camiones.

El estudio de la operación en el sistema de transporte urbano, específicamente el de camiones, se divide dos áreas principales, la planificación de rutas y el control en tiempo real. El proceso de planificación de rutas implica decisiones estratégicas (frecuencia de salida de los camiones), tácticas (ubicación de las paradas y definición del horario de llegada en cada parada de los camiones) y operacionales (programación de salida de camiones, llegada de choferes y plan de mantenimiento de camiones). Por otro lado, el control en tiempo real intenta mantener la frecuencia de llegada a cada parada de los camiones durante el transcurso del día con la finalidad de minimizar cualquier inconveniente causado por el tráfico vial. Durante el transcurso del día, los cambios en flujo de usuarios, el tráfico vial e incluso la hora del día provoca modificaciones a la frecuencia de llegada de cada camión a la parada dando lugar al amontonamiento de camiones.

El presente trabajo trata el problema desde el punto de vista del usuario por lo que es de interés que el tiempo de espera en la parada sea el menor posible. En nuestro caso nos enfocamos en la Ecovía que es un sistema de transporte colectivo

integrado con camiones que cuenta con un carril exclusivo “Bus Rapid Transit” (en inglés) y presta su servicio en el área metropolitana de la ciudad de Monterrey. Los camiones cuentan únicamente con una puerta para el ascenso y descenso de usuarios, de esta manera los usuarios antes de abordar al camión deben esperar el descenso de los usuarios dentro del camión. Además, el hecho de tener un carril exclusivo para el trayecto de sus camiones causa que un camión no pueda adelantar a otro. Nuestra propuesta para darle solución a este problema está enfocada en tener un control de la diferencia entre el tiempo de dos camiones consecutivos. Se busca mantener el plan de las frecuencias de llegada de los camiones a las paradas durante la operación diaria. Si la agencia de transporte logra ajustarse al horario planeado, desde el punto de vista de los usuarios, refleja un buen servicio.

7.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una simulación realizada con el lenguaje de programación R que reproduce el trayecto de los camiones durante una jornada laboral. Además, un modelo matemático lineal de optimización combinatoria que permite realizar una planificación en tiempo real que mantiene avances congruentes entre camiones consecutivos y disminuye el amontonamiento de camiones.

Los experimentos realizados mostraron un comportamiento proporcional creciente entre los amontonamientos y el tiempo de espera promedio, es decir conforme los amontonamientos aumentan el tiempo de espera promedio aumenta. Podemos separar los resultados obtenidos en dos secciones, cantidad de amontonamientos y tiempo de espera.

Al analizar los resultados respecto a la cantidad de amontonamientos y la frecuencia de salida de los camiones del depósito (cabecera) se observó que cuando la salida de camiones es cada dos minutos la cantidad de amontonamientos es al menos tres veces mayor que las salidas de los camiones cada cuatro y seis minutos. Por otro lado, cuando la capacidad del camión es de 150, la cantidad de amontonamientos

alcanza el valor de 250. En cambio, cuando la capacidad del camión es de 80 o 100, los amontonamientos, aproximadamente, alcanza el valor de 175. Ahora, centrando los resultados en los amontonamientos y la duración máxima de un camión en una parada. Se observa un comportamiento decreciente cuando el tiempo de retención es mayor.

Los resultados correspondientes al tiempo de espera promedio y la cabecera muestran que si la frecuencia de salida de los camiones es cada dos minutos el tiempo de espera promedio es menor comparado con la frecuencia de salida cada cuatro y seis minutos. Por otra parte, el menor tiempo de espera experimentado por los usuarios se obtuvo cuando la capacidad del camión es de 150. Por último, el menor tiempo de espera promedio con respecto a la duración máxima de un camión en una parada se produjo cuando la retención tomó el valor de diez minutos.

7.2 TRABAJO A FUTURO

En este trabajo se presentó una simulación de un corredor de camiones y un modelo matemático que se enfoca en lograr avances congruentes entre camiones consecutivos. El siguiente paso sería entrelazar la simulación y el modelo matemático mediante una simheurística para determinar horarios de salida de los camiones en tiempo real con la finalidad de minimizar el tiempo de espera promedio de los usuarios. Otros análisis de interés son: el tiempo de servicio promedio y el tiempo en el sistema promedio. El primero es el tiempo desde que un usuario sube al camión hasta que se baja. El segundo, es el tiempo desde que un usuario llega a la parada hasta que baja del camión.

Se pretende incorporar diferentes escenarios para mejorar el problema en situaciones que ocurren en la realidad. Algunos de estos escenarios son: agregar camiones con diferentes capacidades, como en la Ecovía la cual cuenta con tres tipos de camiones; la existencia de inconvenientes, como fallas mecánicas en los camiones o accidentes viales, que provoquen la retención inesperada de un camión o camiones

en algún lugar distinto a una parada, o en la parada misma; y la velocidad variable durante el recorrido de los camiones.

Otro escenario a tener en cuenta es el de considerar viajes con bifurcación de trayecto entre terminales, como se menciona en la sección 3.2 en la página 14, donde la Ecovía tiene dos viajes de este tipo, uno que inicia en Lincoln y termina en Mitras, y el otro que inicia en Mitras y termina en Regina. Finalmente, incorporar la capacidad de liberar camiones, ya sea desde el depósito o alguna otra parada, que sirvan de apoyo estratégico antes de la salida de un siguiente camión para cubrir con la demanda de usuarios esperando en paradas críticas permitirá complementar las situaciones de un sistema real.

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Un agrupamiento de cuatro camiones en el sistema de transporte Ecovía.	11
3.2. Avance entre dos camiones, k y $k + 1$.	11
3.3. Causas principales del amontonamiento de camiones.	13
3.4. Estaciones de la Ecovía.	15
3.5. Mapa de localización de estaciones del sistema de transporte Ecovía.	16
3.6. Usuarios esperando el turno para ascender o descender un camión en el sistema de transporte Ecovía.	16
5.1. a) avance congruente entre los camiones k y $k + 1$, b) y c) avance no congruente entre los camiones k y $k + 1$.	23
5.2. Ejemplo de corredor de tránsito con seis paradas y cinco camiones en un instante t^0 .	24
5.3. Visualización de penalización.	27
6.1. Corredor de camiones con valores $\alpha = \beta = 0.05$.	35
6.2. Corredor de camiones con valores $\alpha = \beta = 0.07$.	36
6.3. Corredor de camiones con valores $\alpha = \beta = 0.1$.	37
6.4. Tiempo de espera promedio respecto a la cantidad de amontonamientos.	37

6.5. Cantidad de amontonamiento de camiones respecto a la duración de la jornada.	38
6.6. Cantidad de amontonamiento de camiones respecto a la frecuencia de salida de los camiones en el depósito.	38
6.7. Cantidad de amontonamiento de camiones respecto a la capacidad máxima de usuarios del camión.	39
6.8. Cantidad de amontonamiento de camiones respecto a la duración máxima de un camión en una parada.	40
6.9. Tiempo de espera promedio respecto al tiempo de cabecera.	41
6.10. Tiempo de espera promedio respecto a la capacidad máxima de usuarios.	41
6.11. Tiempo de espera promedio respecto al tiempo máximo de retención del camión en una parada.	42

ÍNDICE DE TABLAS

6.1. Valor de los parámetros de la simulación.	34
--	----

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABKOWITZ, M. D. y M. LEPOFSKY, «Implementing headway-based reliability control on transit routes», *Journal of Transportation Engineering*, **116**(1), págs. 49–63, 1990.
- [2] ASSOCIATES, K. ., U. S. F. T. ADMINISTRATION, T. C. R. PROGRAM y T. D. CORPORATION, *Transit capacity and quality of service manual*, 100, Transportation Research Board, 2003.
- [3] BANKS, J., *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*, John Wiley & Sons, 1998.
- [4] BARNETT, A., «On controlling randomness in transit operations», *Transportation Science*, **8**(2), págs. 102–116, 1974.
- [5] BARTHOLDI III, J. J. y D. D. EISENSTEIN, «A self-coördinating bus route to resist bus bunching», *Transportation Research Part B: Methodological*, **46**(4), págs. 481–491, 2012.
- [6] BAZARAA, M. S., J. J. JARVIS y H. D. SHERALI, *Programación lineal y flujo en redes*, segunda edición, Limusa, México, DF, 2004.
- [7] CATS, O., A. LARIJANI, Á. ÓLAFSDÓTTIR, W. BURGHOUT, I. ANDREASSON y H. KOUTSOPOULOS, «Bus-holding control strategies: simulation-based evaluation and guidelines for implementation», *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2274), págs. 100–108, 2012.

-
- [8] CATS, O., A. N. LARIJANI, H. N. KOUTSOPOULOS y W. BURGHOUT, «Impacts of holding control strategies on transit performance: Bus simulation model analysis», *Transportation Research Record*, **2216**(1), págs. 51–58, 2011.
- [9] CEDER, A., *Public transit planning and operation: Modeling, practice and behavior*, CRC press, 2007.
- [10] CHANDRASEKAR, P., R. LONG CHEU y H. C. CHIN, «Simulation evaluation of route-based control of bus operations», *Journal of transportation engineering*, **128**(6), págs. 519–527, 2002.
- [11] CHVATAL, V., V. CHVATAL *et al.*, *Linear programming*, Macmillan, 1983.
- [12] DAGANZO, C. F., «A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons», *Transportation Research Part B: Methodological*, **43**(10), págs. 913–921, 2009.
- [13] DAGANZO, C. F. y J. PILACHOWSKI, «Reducing bunching with bus-to-bus cooperation», *Transportation Research Part B: Methodological*, **45**(1), págs. 267–277, 2011.
- [14] DE ARMAS, J., A. A. JUAN, J. M. MARQUÈS y J. P. PEDROSO, «Solving the deterministic and stochastic uncapacitated facility location problem: from a heuristic to a simheuristic», *Journal of the Operational Research Society*, **68**(10), págs. 1161–1176, 2017.
- [15] DELGADO, F., J. MUÑOZ, R. GIESEN y A. CIPRIANO, «Real-time control of buses in a transit corridor based on vehicle holding and boarding limits», *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2090), págs. 59–67, 2009.
- [16] DELGADO, F., J. C. MUNOZ y R. GIESEN, «How much can holding and/or limiting boarding improve transit performance?», *Transportation Research Part B: Methodological*, **46**(9), págs. 1202–1217, 2012.

- [17] DING, Y. y S. CHIEN, «Improving transit service quality and headway regularity with real-time control», *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1760), págs. 161–170, 2001.
- [18] EBERLEIN, X. J., N. H. WILSON y D. BERNSTEIN, «The holding problem with real-time information available», *Transportation science*, **35**(1), págs. 1–18, 2001.
- [19] ECOVÍA, «Sistema de transito rápido Ecovía», <http://ecovia.nl.gob.mx/about.html>, 2014.
- [20] FIGLIOZZI, M. A., W.-C. FENG, G. LAFFERRIERE y W. FENG, «A Study of headway maintenance for bus routes: Causes and effects of bus bunching in extensive and congested service areas», , 2012.
- [21] FISHMAN, G. S., *Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [22] FU, L. y X. YANG, «Design and implementation of bus-holding control strategies with real-time information», *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1791), págs. 6–12, 2002.
- [23] HERNÁNDEZ-LANDA, L. G., M. L. MORALES-MARROQUÍN, R. S. NIGENDA y Y. Á. RÍOS-SOLÍS, «Linear bus holding model for real-time traffic network control», en *Applied Simulation and Optimization*, Springer, págs. 303–319, 2015.
- [24] HICKMAN, M. D., «An analytic stochastic model for the transit vehicle holding problem», *Transportation Science*, **35**(3), págs. 215–237, 2001.
- [25] HILLIER, F. S., G. J. LIEBERMAN y M. A. G. OSUNA, *Introducción a la Investigación de Operaciones*, tomo 1, McGraw-Hill, 1997.
- [26] IBARRA-ROJAS, O., F. DELGADO, R. GIESEN y J. MUÑOZ, «Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review», *Transportation Research Part B: Methodological*, **77**, págs. 38–75, 2015.

- [27] INEGI, «Estadísticas de transporte urbano de pasajeros», <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/registros/economicas/transporteurbano/>, 2016.
- [28] JERRY, B., *Discrete event system simulation*, Pearson Education India, 2005.
- [29] JUAN, A. A., J. FAULIN, S. E. GRASMAN, M. RABE y G. FIGUEIRA, «A review of simheuristics: Extending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems», *Operations Research Perspectives*, **2**, págs. 62–72, 2015.
- [30] KARLIN, S., *A first course in stochastic processes*, Academic press, 2014.
- [31] KOVÁCS, G., P. TATHAM y P. D. LARSON, «What skills are needed to be a humanitarian logistician?», *Journal of Business Logistics*, **33**(3), págs. 245–258, 2012.
- [32] LAW, A. M., W. D. KELTON y W. D. KELTON, *Simulation modeling and analysis*, tomo 2, McGraw-Hill New York, 1991.
- [33] MANCILLA HERRERA, A. M., «Simulación Herramienta para el estudio de sistemas reales», *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, (6), págs. 104–112, 2011.
- [34] MORENO, J. R., *Técnicas de simulación y planificación de transporte para el estudio de problemas de tráfico en entornos urbanos y metropolitanos*, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 2003.
- [35] PILACHOWSKI, J. M., *An approach to reducing bus bunching*, University of California, Berkeley, 2009.
- [36] POCHET, Y. y L. A. WOLSEY, *Production planning by mixed integer programming*, Springer Science & Business Media, 2006.

-
- [37] PUONG, A. y N. H. WILSON, «A train holding model for urban rail transit systems», en *Computeraided systems in public transport*, Springer, págs. 319–337, 2008.
- [38] ROSS, S., *A First Course in Probability 8th Edition*, Pearson, 2009.
- [39] ROSS, S. M., *A course in simulation*, Prentice Hall PTR, 1990.
- [40] ROSS, S. M., *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists*, Academic Press, 2014.
- [41] SUN, A. y M. HICKMAN, «The holding problem at multiple holding stations», en *Computeraided systems in public transport*, Springer, págs. 339–359, 2008.
- [42] TAHA, H. A., *Investigación de operaciones*, Pearson Educación, 2004.
- [43] WINSTON, W. L. y J. B. GOLDBERG, *Operations Research: Applications and Algorithms*, Thomson Brooks Calif, 2004.
- [44] XUAN, Y., J. ARGOTE y C. F. DAGANZO, «Dynamic bus holding strategies for schedule reliability: Optimal linear control and performance analysis», *Transportation Research Part B: Methodological*, **45**(10), págs. 1831–1845, 2011.
- [45] YANG, H. y J. ZHOU, «Optimal traffic counting locations for origin–destination matrix estimation», *Transportation Research Part B: Methodological*, **32**(2), págs. 109–126, 1998.
- [46] ZEIGLER, B. P., H. PRAEHOFER y T. G. KIM, *Theory of modeling and simulation: integrating discrete event and continuous complex dynamic systems*, Academic press, 2000.
- [47] ZHAO, J., S. BUKKAPATNAM y M. M. DESSOUKY, «Distributed architecture for real-time coordination of bus holding in transit networks», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **4**(1), págs. 43–51, 2003.

-
- [48] ZOLFAGHARI, S., N. AZIZI y M. Y. JABER, «A model for holding strategy in public transit systems with real-time information», *International Journal of Transport Management*, **2**(2), págs. 99–110, 2004.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Citlali Maryuri Olvera Toscano

Candidato para obtener el grado de Maestra en Ciencias
en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

MODELO MATEMÁTICO E IMPLEMENTACIÓN DE
UN SIMULADOR BASADO EN UN SISTEMA DE
TRANSPORTE URBANO

Nací el 30 de julio de 1993 en Tula, Tamaulipas. Realicé todos mis estudios previos a la licenciatura en Ciudad del Maíz, San Luis Potosí, lugar donde crecí. En el año 2011 ingresé a la Unidad Académica de Matemáticas de la Universidad Autónoma de Zacatecas en donde realicé mis estudios de Licenciada en Matemáticas la cual concluí en julio del 2015. Obtuve el grado de Licenciada en Matemáticas con Opción Terminal en Matemática Aplicada en marzo del 2016, mediante la tesis titulada “Apareamientos Policromáticos”. En Agosto del 2016 ingresé a la Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica perteneciente a la Universidad Autónoma de Nuevo León.