



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA
DE LA COMPUTACIÓN**

**“MODELOS Y SIMULACIONES MULTI-ESCALA DE
SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**DOCTOR EN CIENCIAS
(COMPUTACIÓN)**

P R E S E N T A

GUSTAVO CARREÓN VÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. LUIS ALBERTO PINEDA CORTÉS

CODIRECTOR: DR. CARLOS GERSHENSON GARCÍA

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN
MATEMÁTICAS APLICADAS Y EN SISTEMAS**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

ENERO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Ant colonies, highway traffic, market economies, immune systems— in all of these systems, patterns are determined not by some centralized authority but by local interactions among decentralized components.

Mitchell Resnick

En aquel Imperio, el Arte de la Cartografía logró tal Perfección que el mapa de una sola Provincia ocupaba toda una Ciudad, y el mapa del Imperio, toda una Provincia. Con el tiempo, estos Mapas Desmesurados no satisficieron y los Colegios de Cartógrafos levantaron un Mapa del Imperio, que tenía el tamaño del Imperio y coincidía puntualmente con él.

Jorge Luis Borges

*A Emiliano y Celsi, los dos
más grandes motivos ...*

Resumen

Los sistemas de transporte públicos son utilizados por millones de personas alrededor del mundo. Existen diferentes formas de regular su dinámica. En este trabajo de tesis se presentan mecanismos de regulación en dos escalas de organización; una global y otra local, donde se considera la dinámica de los trenes y de los pasajeros respectivamente. A través de simulaciones computacionales alimentadas con datos reales del Metro de la Ciudad de México se establecen los efectos y el desempeño de los métodos, así como las repercusiones de su aplicación en el sistema real. Para la recolección de datos en el Metro fue crucial la participación en el Primer Premio a la Innovación Tecnológica “Ing. Juan Manuel Ramírez Caraza” organizado por el Sistema de Transporte Colectivo Metro.

En este trabajo de tesis se establece una introducción general donde se plasma la relación entre los métodos utilizados y la importancia de validar los resultados frente a la dinámica real. Posteriormente se describen los modelos utilizados, la aportación de los métodos de regulación General (GM) y Auto-organizante II o Self-organizing Method II (SOM-II) y el desarrollo de un simulador computacional considerando la estructura de la Línea 1 del Metro de la Ciudad de México. Posteriormente se da una descripción detallada del proceso de ascenso y descenso en vagones, el desarrollo del simulador computacional y los resultados obtenidos en el estudio piloto aplicado en la estación Balderas de la Línea 1 en diciembre de 2016. Finalmente, se establece una discusión, un conjunto de recomendaciones para mejorar los sistemas de transporte públicos y la conclusión.

Agradecimientos

Mi estancia en el Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación de la UNAM fue una experiencia enriquecedora en todos los sentidos, fue un gran logro en mi formación académica pero sobretodo transformó mi manera de ver la vida. Durante el desarrollo de mi proyecto de investigación recibí apoyo de una gran cantidad de colegas, amigos y por supuesto familia, sería imposible nombrarlos a todos, siempre estaré agradecido con ellos.

En especial agradezco a mis tutores del Posgrado, al Dr. Luis A. Pineda Cortés y al Dr. Carlos Gershenson García, por sus enseñanzas, pláticas, discusiones, y apoyo a lo largo de estos años. Sus palabras, más allá de lo académico, me sirvieron para crecer como persona. A mi comité académico y sinolades, Dr. Mario Peña, Dra. María Elena Lárraga, Dr. Christopher Stephenes y Dr. Felipe Lara, sus observaciones siempre enriquecieron mi trabajo de investigación.

A Jorge Zapotécatl y Tania Pérez por su apoyo y participación en el proyecto *#Metrrevolución: Ascenso y descenso eficiente en vagones*, gracias por compartir esta experiencia conmigo, fueron esenciales para el buen desarrollo y éxito del estudio piloto en la estación Balderas.

Agradezco el apoyo del Sistema de Transporte Colectivo Metro, al Ing. Jorge Gaviño por las facilidades otorgadas para llevar a cabo la intervención en la estación Balderas. En particular agradezco al Ing. Ernesto Lira y a su equipo de trabajo por su buena disposición, me adentraron al mundo del Metro. Al Dr. José Ángel Bermejo y al Ing. José Antonio Barajas por el seguimiento de la investigación en el marco del *Primer Premio a la Innovación Tecnológica* y el apoyo para realizar el estudio piloto.

Aprendí mucho colaborando con Luis Enrique Cortés, Carlos Piña, Jesús Mario Siqueiros y Nelson Fernández; fue divertido, sus observaciones siempre complementaron mi trabajo.

Agradezco al Seminario de Educación Superior de la UNAM, al Dr. Humberto Muñoz García y Dr. Imanol Ordorika por el tiempo y comprensión para llevar a cabo este proyecto; de la misma manera a Dora, Luis y Alejandra. A la directora del Instituto de Investigaciones Económicas, la Dra. Verónica Villarespe, por el apoyo para concluirlo.

La retroalimentación de los colegas del *Seminario de Complejidad y Economía* siempre fue importante.

Al personal del Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación de la UNAM, al Coordinador Dr. Javier Gómez, Lulú, Ceci y Amalia, gracias por todo.

A la Dra. Laura Vargas y Carlos Aguilar del C3-UNAM por el apoyo en el desarrollo de los spots del proyecto *#Metrevolución*.

Esta investigación tuvo el soporte del Programa de Apoyo para la Superación del Personal Académico (PASPA) de la DGAPA-UNAM, y del proyecto Conacyt No. 212802, *Guiando comportamientos para mejorar la movilidad urbana*.

A mi familia por su comprensión y apoyo a lo largo de este periodo; a mis amigos Jesús y Vicente que me escucharon y apoyaron en algunos de los momentos más difíciles.

Y a todas las personas que contribuyeron de alguna forma con sus ideas, consejos, vivencias y experiencias, no cabe duda que todos tenemos algo que decir acerca del Metro.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Estructura de la tesis	3
2. Escala global y local para estudio de los sistemas de transporte público	7
2.1. Escala global. Regulación de los intervalos	8
2.2. Escala local. Regulación del ascenso y descenso de pasajeros .	11
3. Conceptos y modelos de sistemas de transporte público	15
3.1. Los intervalos de los trenes	15
3.2. Inestabilidad de intervalos iguales	18
3.3. Modelo de Gipps	20
3.4. Modelo de Gipps Extendido	21
3.4.1. Extensión 1: Línea de visión	22
3.4.2. Extensión 2: Distancia de seguridad	22
3.4.3. Extensión 3: Frenado autónomo	23
3.4.4. Parámetros del modelo	25
3.5. Método auto-organizante para regular los intervalos	29
3.6. Modelo de regulación para STP	32
3.6.1. Método General	34
3.6.2. Método Auto-organizante II	34
3.7. Discusión	36
4. Simulación de sistemas de transporte público	37
4.1. Elementos y características de la simulación	37
4.1.1. Obtención de datos empíricos	39
4.1.2. Modelado de la Línea 1 del Metro de la Ciudad de México	40
4.1.3. Dinámica de pasajeros	41

4.2.	Desempeño de los métodos de regulación	42
4.2.1.	Correlación con el Metro de la Ciudad de México	43
4.2.2.	Comparación de métodos de regulación	46
4.2.3.	Interfaz del simulador	52
4.3.	Discusión	54
5.	Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros	55
5.1.	Caracterización del tiempo en estación	56
5.2.	Estado actual del proceso de ascenso y descenso en el Metro de la Ciudad de México	58
5.3.	Tiempo efectivo de ascenso y descenso	64
5.4.	Regulación del tiempo de puertas abiertas	67
5.5.	Estrategia “Señalamientos guía en plataforma”	68
5.5.1.	Modelo de Fuerzas Sociales	73
5.5.2.	Simulación computacional	75
5.6.	Estrategia “Puertas Dedicadas”	83
5.7.	Comparación de estrategias	87
5.8.	Discusión	88
6.	Intervención en el Sistema de Transporte Colectivo Metro	91
6.1.	Fase de preparación	91
6.1.1.	Diseño de los señalamientos guía en plataforma	92
6.2.	Fase de instalación	95
6.3.	Fase de intervención	99
6.4.	Fase de Resultados	103
6.4.1.	Intervalos	103
6.4.2.	Tiempo efectivo de ascenso y descenso	107
6.4.3.	Tiempo de cierre de puertas	111
6.4.4.	Tiempo de estacionamiento	115
6.5.	Discusión	118
7.	Discusión general y conclusiones	123
7.1.	Escala global	124
7.2.	Escala local	127
7.3.	Recomendaciones	128
7.4.	Conclusiones	129

Índice de cuadros

1.	Pseudocódigo para calcular el espacio <i>inicio-de-frenado, velocidad-deseada</i>	24
2.	Pseudocódigo para calcular el espacio <i>frenado, velocidad-deseada</i>	26
3.	Pseudocódigo para calcular el espacio <i>frenado - velocidad deseada</i>	26
4.	Parámetros del Modelo de Gipps extendido considerando las propiedades de los trenes del MXM.	28
5.	Pseudocódigo del control principal del simulador.	32
6.	Pseudocódigo de la actualización de la variable antiferomona . La tasa de crecimiento se establece como el tiempo de paso de la simulación, en este caso 2/3 de segundo.	35
7.	Estaciones con señalamientos.	121

Índice de figuras

1. **Relación de métodos (A) General, (B) Auto-organizante II and (C) Auto-organizante original.** En este diagrama se representa la relación entre los métodos de regulación (azul), con los datos reales (negro) y con un escenario abstracto idealizado (verde). 10

2. **Falta de regulación de pasajeros en la plataforma.** (A) Los pasajeros se posicionan enfrente de las puertas sin respetar los señalamientos del vagón “Antes de entrar permita salir”. (B) El flujo del interior choca con el del exterior provocando fricciones y empujones. Se generan retrasos importantes debido a una mala regulación en la plataforma, aún y cuando las densidades no son muy altas. 12

3. **Mediciones del headway realizadas en la estación Balderas de la Línea 1 en horario de alta afluencia de 6:00 a 10:00 am.** (A) La distribución está formada con 98 mediciones, muestra una dispersión grande respecto al intervalo óptimo y presenta una cola larga caracterizada por intervalos de más de 5 minutos, usualmente provocada por fallas y mal funcionamiento de la infraestructura y en ocasiones por el comportamiento de los usuarios. La frecuencia máxima se encuentra alrededor de 120-130 segundos, aunque la media está en 144 segundos, ilustrada con la barra en gris. (B) La serie de tiempo muestra la irregularidad del paso de los trenes en la estación. 17

4. **Ejemplo ilustrativo de la inestabilidad del headway.**
 (A) Se inicia con una configuración de intervalos iguales y segmentos interestación homogéneos entre estaciones, se hace notar que el tren a llegará primero a la estación que el tren b y los subsecuentes. (B) Existen estaciones con más afluencia que otras, como consecuencia los intervalos entre los trenes se acortan o alargan, como sucede con los trenes b y c , y c y d respectivamente. (C) Se forman cúmulos de trenes (c , d y e) y empiezan a saturarse las estaciones que no han sido alcanzadas recientemente. 18
5. **Número de usuarios de la Línea 1 en el año 2014.** (A) La variabilidad de afluencia depende de la estación. El número total de usuarios en la Línea 1 fue de 263,708,660. (B) Serie de tiempo de afluencia por día hábil en la estación Balderas. . . 19
6. **Agentes en la línea de visión y distancia de seguridad.**
 El alcance de la línea de visión se establece a partir de la coordenada inicial $x_n + Sn$ hasta el valor establecido en la simulación, por ejemplo, 1500 metros. Si en este rango se encuentra algún agente se procede a calcular alguna de las ecuaciones del modelo de Gipps. Esta es una estrategia eficiente porque en la mayoría de los casos no es necesario calcular la aceleración (3) y la desaceleración (4) simultáneamente. La distancia de seguridad es el espacio que existe entre los trenes y no está permitido sobrepasarla. 22
7. **Estrategia de objeto fantasma colocado en la posición óptima.** La colocación del objeto fantasma O_1 en una posición que no es la adecuada (i.e. O_2) puede causar que el frenado no sea instantáneo. A priori se calcula una tabla de distancias óptimas para realizar el frenado autónomo. 23
8. **Representación gráfica del espacio de parámetros inicio-de-frenado, velocidad-deseada.** Se muestra el resultado de 54,880 experimentos, a cada punto se le asigna un color en relación a la distancia inicial de frenado. La gama de colores está normalizada a 1.0, por ejemplo, la zona en gris corresponde a las distancias más cortas, y las azules a las distancias más largas. 24

9.	Espacio de parámetros respecto a la velocidad deseada V. (A) Frenado. (B) Aceleración. La gama de colores indica el tiempo empleado.	27
10.	Diagrama de flujo para el SO. El ciclo de ascenso de pasajeros se muestra con las flechas en rojo, las flechas en verde muestra los casos en lo que parte el tren de la estación. El ascenso y descenso se encuentra separado, lo que implica un mecanismo de regulación extra en la plataforma para el ascenso y descenso.	31
11.	Diagrama de flujo general. (A) Método General (negro). (B) Método Auto-organizante II (rojo). Los procedimientos en común están marcados en azul. . . .	33
12.	Relación de los agentes y sus procesos. Las aristas representan la relación que existe entre los agentes considerados en la simulación.	39
13.	Grabaciones realizadas en la Línea 1 del MXM. (A) Grabación en el interior del vagón en horario de alta afluencia. (B) Grabación en la plataforma de la estación Pino Suárez, se muestra el ascenso y descenso de pasajeros.	40
14.	Fragmento de la simulación computacional de la Línea 1 del MXM. Las estaciones tienen un color azul con su identificador en la parte de arriba, los semáforos son los círculos en color rojo o verde, los trenes muestran la carga actual del vagón (en blanco), y la persona muestra la cantidad de pasajeros que están esperando en la estación (en negro). La posición del punto de medición del headway está en color naranja y coincide con la posición donde las mediciones empíricas fueron tomadas.	41

15. **Tiempo efectivo de ascenso y descenso.** (A) Se consideraron 14 carreras (terminal Pantitlán a terminal Observatorio y viceversa) que equivalen a 280 ascensos y descensos. En el eje horizontal se muestra la suma de pasajeros que suben y bajan, debido a que existe una desorganización en el proceso de ascenso no se pueden separar los tiempos. El tiempo de ascenso y descenso de 1 a 4 pasajeros se incrementa notablemente en horas pico por la necesidad de subirse al vagón sin importar la obstrucción que pueden provocar en las puertas; por ejemplo, una persona puede tardar hasta 9 segundos en subir debido a su comportamiento inadecuado. (B) Se muestran los promedios de cada componente elaborado con los datos de la figura (A); si descartamos este tipo de dinámicas en eventos donde están involucrados hasta 4 pasajeros el promedio general se ajusta a 1.06 pasajeros por segundo (línea en verde), mientras que, si se consideran los eventos de 4 pasajeros sube a 1.38 pasajeros por segundo en promedio (línea en rojo). 42
16. **Medidas tomadas en la estación Pino Suárez de la Línea 1.** (A) Histograma del tiempo de estacionamiento en ventanas de 5 segundos, el mínimo valor es 19 y el máximo 255. (B) Histograma del retraso en la partida del tren en ventanas de 3 segundos. Se contabiliza a partir del cierre de puertas ya que el tren está en condiciones de partir pero no lo hace por circunstancias externas; la mayoría de los retrasos se encuentran en las ventanas de 3 y de 6 segundos. 44
17. **Histogramas de la frecuencia del headway.** El valor del headway promedio en el sistema real es 147 segundos (A) y en el simulado con el método GM es 132 segundos, ilustrados con la barra en gris (B). 45
18. **Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación de Pearson entre la distribución del intervalo de la Línea 1 y 100 simulaciones del GM.** El máximo valor se encuentra en 0.98 y el promedio en 0.88 (barra en gris). 46

19.	<p>Comportamiento del intervalo con el SOM-II. (A) Distribución del intervalo conservando la misma escala de tamaño de ventana para comparar adecuadamente con la distribución del intervalo del MXM y del método GM. (B) Comportamiento típico de las series de tiempo de los intervalos, en la estación Pino Suárez de la simulación.</p>	47
20.	<p>Comparación de los métodos de regulación GM y SOM-II. (A) Tiempo promedio de viaje de pasajeros. (B) Tiempo promedio de salida de pasajeros del sistema. (C) Velocidad promedio de pasajeros. (D) Velocidad promedio de trenes.</p>	48
21.	<p>Modelado de una falla mecánica. La falla mecánica empieza y termina en el minuto $t_i = 209$ y $t_f = 224$ respectivamente. (A) Los valores del intervalo más altos en la serie de tiempo de GM representa la formación de cúmulos; el sistema no es capaz de restablecer el intervalo. (B) La serie de tiempo del SOM-II muestra que el método es robusto frente a perturbaciones y es capaz de restaurar el intervalo en poco tiempo.</p>	50
22.	<p>Diagramas espacio-tiempo de los trenes. (A) Después de la falla mecánica con el GM, el sistema exhibe patrones en forma de rayas, características de la inestabilidad de intervalos iguales. (B) Antes y después de la falla mecánica, el SOM-II exhibe un patrón homogéneo y estable; los trenes enfrente del $tren_0$ esperan más en la estación antes de que la falla mecánica termine; debido a que se retrasa la partida del tren por el balance entre las variables $ETNextTrain$ y $antipheromoneStation$, se mejora y acelera la capacidad de recuperación del sistema.</p>	51

23. **Captura de pantalla de los controles del simulador.** Los controles definen el comportamiento de la simulación: el número de iteraciones (*iterations*), el número de iteraciones consideradas transitorias (*transitory*), el método de regulación (*self-organizing-II* o *general-cdmx*), la distribución de los trenes (*equidistant, accumulated*), el número de estaciones (*#stations*), el número de trenes (*#trains*), la magnitud del flujo de pasajeros (*lambda-passengers*), capacidad del tren (*train-capacity*), línea de visión (*line-of-vision*), tiempo de abordaje máximo (*ETABoard-max*), tiempo de abordaje mínimo (*ETABoard-min*), el retraso en la partida del tren (*ETABoard-noise*), la velocidad del tren (*train-speed*), la aceleración del tren (*train-acceleration*), el frenado del tren (*train-braking*) y el tiempo de actualización de las gráficas (*update-graphs*). 52
24. **Captura de pantalla del ambiente y gráficas del simulador.** Se muestra la ejecución de 20,000 iteraciones del SOM-II con las características de la línea 1. Las graficas permiten monitorear el desempeño de los métodos de regulación como la distribución del headway, la desviación estándar del headway, las distancias entre trenes, la desviación estándar de las distancias entre trenes, el histograma del tiempo de estacionamiento de los trenes, el flujo de pasajeros, el tiempo promedio de viaje de los pasajeros, el histograma del tiempo de espera de los pasajeros en las estaciones y el histograma del tiempo interestación de los trenes. 53
25. **Caracterización del recorrido del tren de una estación A a B.** En el MXM el tiempo en la estación contribuye de 25 a 40 % del tiempo total de viaje. 56
26. **Serie de tiempo de ascenso-descenso en estación Pino Suárez.** Registro en una puerta del vagón en la estación Pino Suárez de la Línea 1 en un horario de 6:20 a 8:20 am. El mayor número de descensos fue de 34 y el menor de 7; por su parte, el mayor número de ascensos fue de 20 y el menor de 4. En general la estación Pino Suárez por la mañana presenta un mayor número de descensos que de ascensos. 59

27. **Histograma del tiempo de cierre de puertas de los vagones.** Registro en la estación Balderas de la Línea 1 de 6:00 a 10:00 am. Los eventos más frecuentes son los que invierten de 2 a 4 segundos, que equivale al 50 %; el otro restante, se distribuye hasta los 95 segundos. Es recomendable regular este comportamiento con un mecanismo que fomente la espera en la plataforma cuando el vagón está totalmente lleno. 60
28. **Tiempo de puertas abiertas.** (A) Serie de tiempo registrada en la estación Balderas de 6:00 a 10:00 am, existen valores de más de 200 segundos (más de 3 minutos), (B) Histograma del tiempo de puertas abiertas. La mayoría de los eventos se encuentran en el rango de 10 a 30 segundos, sin embargo, existen eventos de más de 200 segundos lo que indica una gran inestabilidad en los tiempos. 61
29. **Comportamiento de los usuarios en la Línea 1.** (A) Terminal Pantitlán a las 7:50 am. Los usuarios se reparten a lo largo de la plataforma; el ascenso ocurre rápido y sin obstrucciones debido a que el tren llega vacío, sin embargo, hay muchos empujones y fricciones. (B) Estación Balderas a las 8:36 am. El ascenso y descenso resultan muy complicados en momentos de saturación. (C) Estación Pino Suárez a las 7:30 am. Los pasajeros de la plataforma bloquean el descenso. La falta de regulación y de orden genera fricción y empujones entre los pasajeros. 63

30. **Tiempo efectivo de ascenso-descenso.** La gráfica está compuesta con 235 eventos en diferentes condiciones de saturación. Las etiquetas de los puntos indican eventos que se desarrollan en las terminales; la etiqueta O_i indica la estación Observatorio en el inicio de la carrera, O_f indica la estación Observatorio al final de la carrera, P_i y P_f indican la terminal Pantitlán al inicio y al final respectivamente, Z_i y B_i indican la estación Zaragoza y Balderas respectivamente al inicio de la carrera, es decir se aplicó una estrategia de omisión de estaciones. Se puede observar lo siguiente: los eventos más rápidos son cuando el tren tiene ascensos y descensos tipo terminal; hay eventos con densidades bajas pero consumen demasiado tiempo, por ejemplo, 3 pasajeros invierten más de 25 segundos; y eventos con densidades altas a tasa de aproximadamente 1 pasajero por segundo (puntos en la parte superior derecha). 65
31. **Histograma 2D del tiempo efectivo de ascenso-descenso.** El histograma muestra la frecuencia de eventos de cada zona, las zonas rojas contabilizan alrededor de 13 a 11 eventos mientras que las zonas en azul 1 evento. 66
32. **Diferencia del TPA y el TEAD.** El histograma indica el tiempo de inactividad y su frecuencia; el más recurrente es de 7 segundos. 67
33. **Histograma de la diferencia del TPA establecido en 24 segundos y el TEAD.** El histograma fue realizado con datos empíricos de la Línea 1 del MXM con muestras en distintos horarios. 68

34. **Ejemplos de formación de flujos de pasajeros en la Línea 1.** (A) Estación Balderas en horario pico matutino. Los usuarios etiquetados del 1 al 5 se disponen a bajar en un ambiente sumamente saturado; se forma un flujo de descenso el cual contribuye para que los pasajeros que están al fondo puedan bajar. Se libera un poco de espacio para que los pasajeros que están en plataforma puedan subir. (B) Estación Tacubaya en horario nocturno. Previamente se crea un flujo de 5 pasajeros, los usuarios que están en la plataforma suben por los laterales formando dos flujos de ascenso. Se invita al lector a ver los videos en la siguiente dirección web <https://www.youtube.com/channel/UC5gGvoaX0cRtLyUqLPk-0TA/>. 69

35. **Ejemplos de señalamientos.** (A) Metro de Dubai. (B) Metro de Hong Kong. 70

36. **Esquema general de la estrategia de señalamientos guía.** 71

37. **Elementos de la simulación.** 76

38. **Condición inicial de la simulación.** 77

39. **Simulación.** Los pasajeros en azul y rojo ubicados en la plataforma esperan a que salgan los pasajeros del interior del vagón. La posición de los pasajeros es una parte importante de la estrategia, se despejan las salidas para que no haya obstrucciones. 77

40. **Simulación.** Los pasajeros en azul y rojo se disponen a subir, se acaba el tiempo de espera debido a que los pasajeros en blanco ya están por salir completamente, aunque los pasajeros de la plataforma inicien el ascenso pueden existir tres flujos simultáneos en la puerta, dos de entrada y uno de salida. . . . 78

41. **Simulación.** Se forman dos flujos en el ascenso, los mismos que se han detectado en mediciones empíricas. Esta configuración es óptima ya que se utiliza todo el espacio de la puerta y la organización hace que disminuya la fricción. Los pasajeros en blanco ya han salido y se disponen a tomar sus salidas (definidas previamente). 78

-
42. **Simulación.** Debido a la estrategia de abordaje de cada usuario, los pasajeros se cargan a su lado preferente, es decir, los pasajeros que entran por la izquierda se van a la izquierda y los que se cargan a la derecha se quedan en la región derecha. Está dinámica se observa empíricamente, las personas mantienen su dirección de entrada. 79
43. **Simulación.** Los usuarios se reparten en el interior del vagón. 79
44. **Simulación.** En esta etapa el proceso de ascenso y descenso ha terminado. La simulación no considera estrategias de acomodamiento. 80
45. **Tiempo de espera de los pasajeros en la plataforma en el proceso de ascenso.** La línea roja indica el tiempo mínimo óptimo t_{op} de espera para el caso de 80 pasajeros que suben y 80 que bajan. 80
46. **Comparación entre señalamientos guía y configuración actual.** La densidad de pasajeros se varía para calcular el tiempo efectivo de ascenso-descenso. El evento extremo ocurre con un vagón totalmente lleno, 200 pasajeros desean bajar y 200 pasajeros desean subir. La línea roja indica un tiempo de espera de 4 segundos, para ciertas densidades se hace óptimo, por ejemplo de 100 a 200 pasajeros; para densidades mayores, el tiempo efectivo de ascenso y descenso empieza a fluctuar. Los mejores tiempos se obtienen cuando los pasajeros en la plataforma esperan a que salgan del vagón para inmediatamente subir. 82
47. **Estrategia Puertas dedicadas.** 83
48. **Inicio de la simulación.** Los pasajeros rojos están distribuidos casi homogéneamente sobre la plataforma, dejan un espacio libre en el centro del vagón para que los pasajeros blancos puedan descender. 84
49. **Simulación.** Los pasajeros empiezan a ubicarse en las entradas y salidas, los blancos se preparan para bajar, mientras que los rojos se disponen a subir. 84
50. **Simulación.** Con esta configuración se observa la formación de un flujo interno circular, el ascenso y descenso genera poca fricción; se asemeja a la dinámica de las terminales. 85
51. **Simulación.** Los pasajeros en blanco libran el cúmulo de rojos que aún están por entrar. 85

52.	Simulación. Los usuarios rojos empiezan a repartirse por los espacios vacíos del tren. Los usuarios blancos casi han terminado de salir del vagón.	86
53.	Simulación. El proceso de ascenso y descenso ha terminado. .	86
54.	Comparación de métodos de regulación con datos reales. Se comparan las dos estrategias contra la configuración actual y datos reales. En la configuración actual hay un tiempo de espera de 2 a 3 segundos, para que permitan la salida de los pasajeros, de lo contrario chocarían inevitablemente y los tiempos crecerían demasiado.	87
55.	Número de ascensos y descensos en una puerta en la estación Balderas antes de la intervención. La serie de descensos y ascensos tiene un promedio de 8.2 y 8.7 pasajeros por evento respectivamente.	92
56.	Diseños de las líneas de contención.	93
57.	Propuesta de señalamiento con zonas de espera. Los pasajeros usarían las zonas naranjas para esperar la llegada del tren; la instalación y el costo de los materiales se incrementarían. .	93
58.	Propuesta de señalamientos con zonas diferenciadas. Los señalamientos en plataforma se conectan ergonómicamente con los señalamientos del piso del vagón. Podría ir acompañado de leyendas para fomentar la preparación del descenso. La instalación requeriría una mayor inversión.	94
59.	Diseño final del señalamiento. Distribución de los elementos, el color amarillo y negro son utilizados en señalización urbana.	94
60.	Medidas de un vagón estándar. En cada salida de las puertas identificadas con A, B, C y D, se colocaron los señalamientos.	95
61.	Señalamiento instalado en plataforma.	96

-
62. **Equipo de trabajo para la instalación de los señalamientos.** De izquierda a derecha, Regina Rosas, Marco Rosas, César González, Jair Castruita, Jesús Enrique Hernández, Gustavo Carreón, Carlos Gershenson, Christopher Chávez, David Antúnez, Vicente Carrión, Carlos Antonio Hernández y Tania Pérez. Se invirtió 6 horas en la instalación de los 72 señalamientos. 97
63. **Diseño de la manta y de los volantes para la difusión.** En el MXM el proyecto tuvo el nombre “Antes de entrar permita salir”, en redes sociales se difundió como #Metrevolución. El diseño estuvo a cargo de Axel Razo, personal del MXM. Se invita al lector a ver los spots del proyecto en el canal de YouTube: https://www.youtube.com/channel/UC0NKP8A1HN_D4pGX9HGu6mw. 98
64. **Surgimiento de filas en el MXM.** Esta fotografía tomada durante el estudio piloto fue utilizada en la portada de Gaceta UNAM del 13 diciembre de 2016; puede consultarla en formato PDF en <http://www.gaceta.unam.mx/20161213/wp-content/uploads/2016/12/131216.pdf>). Fotografía de Gustavo Carreón. 101
65. **Ejemplos de formación de filas en distintos espacios de la estación Balderas.** (A) Área de niños y mujeres. Es posible hacer filas muy grandes por el vestíbulo que existe hacia una de las salidas de la estación. (B) Área mixta. El grosor de la plataforma es de alrededor de 3 metros lo que permite la formación de hasta 8 o 9 pasajeros. 102
66. **Histogramas del headway de la estación Balderas antes de la instalación de los señalamientos.** (A) Octubre 20. El histograma se compone de 101 mediciones, la barra en azul oscuro indica el promedio en 135 segundos. (B) Octubre 26. El histograma se compone de 96 mediciones. Los datos exhiben mucha variabilidad debido a que el headway representa los impactos o perturbaciones en la línea, se notan eventos largos provocados por mal funcionamiento o sobresaturación. 104

67. **Histogramas del headway de la estación Balderas después de la instalación de los señalamientos.** (A) Diciembre 6. El histograma se compone de 93 mediciones. Los eventos más frecuentes se encuentran en el intervalo 100-110 segundos; existe una disminución en los eventos de más de 120 segundos; sin embargo los eventos con valores grandes impactan negativamente el desempeño debido a fallas mecánicas o mala regulación. (B) Diciembre 9. El histograma se compone de 87 mediciones y se nota una dispersión importante; hay intervalos largos de más de 6 minutos. El máximo está en la ventana 120-130 segundos, lo que implica que existen dos dinámicas combinadas, por un lado se cumple por momentos el intervalo de frecuencia de los dos minutos, y por otro, hay retrasos importantes por factores externos. . . . 105
68. **Series de tiempo del headway.** (A) Día 20 de octubre sin señalamientos. La serie muestra mucho ruido y fluctuaciones con una cota inferior de 81 segundos y una superior de 282 segundos. (B) Día 9 de diciembre con señalamientos. El mínimo y máximo intervalo es de 84 y 367 segundos respectivamente. La diferencia entre las dos series es el tamaño de las fluctuaciones ya que no presenta algún orden o regularidad. Son series del headway características de la dinámica del MXM. 106
69. **TEAD en el área de mujeres de la estación Balderas-L1.** Comparación del día 6 de diciembre contra el 20 de octubre de 2016. Los valores altos del TEAD en densidades bajas son producto del comportamiento de los pasajeros necios, aunque el vagón se encuentre saturado, tratan de subir. La línea roja punteada en 28 segundos establece una cota del tiempo máximo registrado con señalamientos. El promedio del TEAD con señalamientos es de 14.5 segundos mientras que sin señalamientos es de 16 segundos lo que implica una mejora del 10 % en este día y horario en particular. Se nota claramente como el comportamiento de los pasajeros necios se minimiza. 108

70. **TEAD en el área de mujeres de la estación Balderas-L1.** Comparación del día 6 de diciembre contra el 26 de octubre de 2016. El promedio del TEAD sin señalamientos es de 17.1 segundos lo que implica una mejora del 15 % en este día en particular. También se nota como disminuye el comportamiento de los pasajeros necios. 109
71. **Separación del tiempo efectivo de ascenso y descenso.** Los datos considerados son del día 6 de diciembre con señalamientos; la gráfica de ascensos (A) se ajusta por medio de una línea de pendiente 0.6 y ordenada 3.7; los tiempos de descenso (B) por una línea de pendiente 0.4 y ordenada 2.1. La gráfica de descensos se nota más compacta y ajustada a la ecuación lineal, lo que implica que hay pocas obstrucciones; el ascenso es más intrincado, ya que depende de la distribución en el interior del vagón. En el descenso existe un caso de obstrucción que se presenta cuando los pasajeros que están en la puerta no bajan; la solución es un reacomodo previo o bajarse del vagón y orillarse; sin embargo, hay casos donde no se mueven creando un descenso con fricciones. 110
72. **Serie de tiempo del retraso en el cierre de puertas del día 20 de octubre sin señalamientos** El promedio de tiempo del cierre de puertas se encuentra en 12.37 segundos, es de esperarse que existan eventos sin obstrucciones de 2 segundos, sin embargo el máximo se encuentra en 54 segundos. En una etapa de la mañana fue muy complicado ya que se notan retrasos importantes. De los días considerados en la muestra, este tuvo el mejor headway promedio (135 segundos), lo que indica que la línea de manera global tenía un buen desempeño; sin embargo, localmente, surgían retrasos. 111
73. **Serie de tiempo del retraso en el cierre de puertas del día 6 de diciembre con señalamientos** El promedio del tiempo de cierre de puertas se encuentra en 9.28 segundos, hubo una reducción del 25 % en comparación con el día 20 de octubre. 112

74. **Comparación de histogramas del TCP.** Días 20 y 26 de octubre sin señalamientos, (A) y (B) respectivamente. Después de los 25 segundos hay eventos importantes, se presenta un evento de 95 segundos no mostrado en el histograma (B). (C) Día 6 de diciembre con señalamientos. La reducción del tiempo promedio respecto al histograma (A) es de 25 % y de (B) es de 15 %. Disminuyen los eventos grandes. 114
75. **Tiempo de estacionamiento.** El día 6 de diciembre fue muy complicado debido a retrasos muy prolongados por factores que no se atribuyen a la dinámica de la estación; su promedio se encuentra en 54.14 segundos con una desviación estándar de 45.08, mientras que el 20 de octubre presentó un promedio de 40.57 y desviación estándar 18.59. De acuerdo a personal de operación del Metro los tiempos óptimos de estacionamiento deberían rondar los 24 segundos, pero éstos no se cumplen. . . 115
76. **Retraso en la partida del tren.** (A) Día 6 de diciembre con señalamientos. (B) Día 20 de octubre sin señalamientos. El tiempo óptimo para partir después del cierre de puertas es de 3 segundos; una vez cumplido este tiempo se puede considerar como retraso. Existen eventos largos de más de 20 segundos. Los dos histogramas exhiben un coeficiente de correlación de Pearson de 0.91. 117
77. **Estación Zapata de la Línea 12 sin señalamientos.** Se muestran las filas organizadas por usuarios en la sección de niños y mujeres de la estación Zapata de la Línea 12. Las dos filas laterales permiten el libre descenso de los pasajeros, para después subir en dos filas simultáneamente. Posterior a la toma de la fotografía y su difusión en redes sociales, el MXM instaló los señalamientos. 122

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad más de la mitad de la población mundial vive en las grandes urbes [1]. Hay 204 sistemas de metros en el mundo usados por aproximadamente 112 millones de usuarios diariamente [2]. En particular, el Metro de la Ciudad de México (MXM) da servicio a 5.5 millones de pasajeros al día y está integrada por 12 líneas [3]. Los sistemas de transporte públicos (STP) están compuestos por grupos de elementos heterogéneos como pasajeros, trenes, vías, estaciones y semáforos. Los modelos computacionales son importantes y útiles para considerar las relaciones entre sus elementos y plasmar las variables más representativas para estudiar el efecto de las interacciones [4–6]. Las simulaciones computacionales alimentadas con bancos de datos reales pueden replicar la dinámica del sistema en diferentes condiciones y, a la vez, generar la capacidad para probar métodos de regulación adecuados en diferentes escalas [7].

Los STP operan con un conjunto de reglas y procedimientos que marcan los manuales de operación y en muchos casos están automatizados o semi-automatizados; en otros, el personal regula la operación. La aplicación del conjunto de reglas de operación, la toma de decisiones con base en el desempeño del sistema y el comportamiento de los usuarios generan la dinámica global, la cual puede ser monitoreada tomando en cuenta los procesos más significativos como: el intervalo de tiempo entre trenes, también conocido como *headway*, los tiempos de ascenso y descenso de pasajeros, y los tiempos en estación e interestación de los trenes. En el trabajo de Moreira-Matias [8], se provee una visión general y definiciones formales en el área, así como estrategias de control y planeación operacional en las que

se usa localización automática de vehículos o *automatic vehicle location*. Los STP tecnológicamente más avanzados tienen la ventaja de implementar con mayor facilidad sistemas de información y de regulación; por ejemplo en el MXM se cuenta con tecnología limitada: los trenes usan sensores básicos en las vías para enviar su posición en puntos específicos al centro de control, no se cuenta con conteo automático de pasajeros o *automatic passenger counting* y el sistema GPS no está disponible; sin embargo, es posible proponer mecanismos de regulación efectivos y adecuados a la infraestructura, como se mostrara en este trabajo de tesis.

Los procesos involucrados en los STP pueden ser de carácter global, como la regulación del headway, las velocidades promedio de los trenes y la capacidad de transporte; y de carácter local, como el proceso de ascenso y descenso de pasajeros en los vagones, los tiempos de estacionamiento del tren y el tiempo de apertura de las puertas.

El objetivo del trabajo de tesis es presentar métodos de regulación en dos escalas de organización; una global y otra local, donde se considera la dinámica de los trenes y de los pasajeros respectivamente. A través de simulaciones computacionales alimentadas con datos reales del MXM se establecen los efectos y el desempeño de los métodos, la importancia de su validación en el sistema real y sus repercusiones; así como la conexión entre estas escalas y como impacta una a la otra.

En la escala global se identifica al fenómeno de la inestabilidad de los intervalos (headway) como la principal causa por la que los STP disminuyen su desempeño [9, 10]. En la escala local se identifica al proceso de ascenso y descenso como una fuente importante de retrasos debido a la falta de regulación y un posible comportamiento no deseable de los pasajeros. Estos problemas serán tratados a detalle en los siguientes capítulos junto con los métodos para su regulación.

1.1. Estructura de la tesis

En el Capítulo 2, se describen los procesos que existen en la escala global y local, se discute la importancia de validar los métodos de regulación y su posible impacto en el sistema real. Se identifican los dos principales problemas de la escala global y local que se tratarán a lo largo del trabajo de tesis; la inestabilidad de los intervalos entre trenes y la regulación en el proceso de ascenso-descenso respectivamente.

En el Capítulo 3, se explica los conceptos y modelos aplicados a los STP que se utilizan a lo largo del trabajo de tesis. Se inicia con la definición de los intervalos entre trenes, conocido como *headway*; se describe el fenómeno de la inestabilidad de los intervalos y su impacto en el rendimiento en los sistemas de transporte público. Dentro de los modelos utilizados se tiene el modelo de flujo vehicular *car-following* de Peter Gipps para caracterizar el flujo de los trenes y las extensiones desarrolladas para hacerlo más flexible y adecuarlo a las necesidades de este trabajo.

Se presenta el método auto-organizante original (SO) de Gershenson [11] para regular los intervalos de manera adaptativa y descentralizada con el uso del concepto de *antiferomona*. Se presentan dos propuesta de regulación, el Método General (GM) que modela la dinámica del Metro de la Ciudad de México, el cual replica las propiedades cualitativas de los intervalos y el Método Auto-organizante II (SOM-II) que se basa en el SO y regula los intervalos de manera adaptativa. Se establecen las diferencias entre los métodos y la forma de acotar el tiempo de estacionamiento del tren; el GM trabaja con tiempos fijos en un contexto estático mientras que el SOM-II adapta sus tiempos a partir de la información local y el uso del concepto de antiferomona. Finalmente se establece una discusión.

En el Capítulo 4, se describen los elementos de la simulación computacional, la recolección de datos empíricos en la Línea 1 del MXM y el modelado del flujo de pasajeros en las estaciones. Se realiza un análisis del desempeño de los métodos de regulación, el GM y el SOM-II. Se muestra la correlación existente entre el GM y los datos empíricos del MXM. Se muestra que el rendimiento del SOM-II es mejor que el esquema usado actualmente en el MXM; como resultado se mejora el intervalo óptimo teórico de 2:10 minutos programado para la línea 1, el cual es el intervalo que los ingenieros del Metro consideran como el estándar para cargas de poca saturación. A través de la

experimentación en el simulador se muestra que el SOM-II puede restaurar el intervalo aún con una configuración inicial de acumulación de trenes o *bus bunching* y con el surgimiento de alguna falla mecánica en los trenes. Al final se da una discusión en el contexto de los resultados obtenidos.

En el Capítulo 5, se describen dos propuestas para regular el ascenso y descenso de pasajeros en los vagones; éstas se prueban en el simulador computacional desarrollado para este trabajo, el cual usa el Modelo de Fuerzas Sociales o *Social Force Model* (SFM) y las funciones de la biblioteca PedSim (*Microscopic Pedestrian Crowd Simulation System*) de Christian Gloor [12].

La primera propuesta es la estrategia “Puertas dedicadas”, en la cual se asignan puertas exclusivas para entrar y para salir; la segunda es, “Señalamientos guía en plataforma” cuyo objetivo es regular el ascenso y descenso de pasajeros en los vagones. Se propone el tiempo efectivo de ascenso y descenso (TEAD) para medir el desempeño de los métodos; ésta consiste en contar los pasajeros involucrados en los flujos principales de intercambio, es decir, los que suben y los que bajan. El TEAD es adecuado ya que forma parte del tiempo de puertas abiertas y representa exactamente el tiempo invertido en el proceso de ascenso y descenso. Se muestran comparaciones entre las estrategias computacionales y los datos empíricos; como resultado principal, el desempeño de los señalamientos guía supera al de puertas dedicadas y a la dinámica actual (sin regulación). Finalmente, se analiza la viabilidad para su implementación en el STC.

En el Capítulo 6, se describe la metodología de la intervención para guiar pasajeros en la estación Balderas de la Línea 1 del MXM. Se muestran los resultados y las implicaciones del nuevo esquema en la cultura de movilidad en el STC. Los señalamientos generan un nuevo orden en la plataforma fomentando la formación de filas y un esquema tipo “primero en llegar, primero en salir” o *first in first out*. A través de mediciones empíricas se muestra la reducción de los retrasos en puertas de 15 a 25%; la disminución del tiempo efectivo de ascenso y descenso de 10 a 15% y una evidente reducción de las fricciones y empujones por parte de los usuarios. Se da una discusión y los beneficios obtenidos.

En el Capítulo 7, se plantea una discusión sobre los alcances de los métodos de regulación y la viabilidad para implementar el SOM-II en los STP ya que

la tecnología se encuentra disponible. También se discute la relevancia de la intervención realizada en la estación Balderas del MXM. Se considera que el buen uso de la infraestructura por parte de los usuarios impacta positivamente en el rendimiento del sistema y se puede mejorar a través de campañas de concientización e información a los usuarios. Para finalizar, se dan algunas recomendaciones para regular y mejorar el desempeño de los STP, así como las conclusiones de este trabajo de tesis.

Capítulo 2

Escala global y local para estudio de los sistemas de transporte público

En este trabajo de tesis se presenta un estudio sobre sistemas de transporte público (STP) en dos escalas de organización; una global y una local. El alcance de la escala global comprende el estudio de una línea de metro, como la Línea 1 del Metro de la Ciudad de México (MXM), en la cual se considera principalmente la dinámica de los trenes. En la escala local, se estudia y analiza la dinámica de los pasajeros, principalmente el proceso de ascenso y descenso. Es viable realizar esta diferencia ya que hay procesos que son particulares de cada escala, sin embargo, hay otros que no se pueden estudiar por separado. Por ejemplo, el tiempo de estacionamiento del tren, localmente está influenciado por el proceso de ascenso y descenso, pero globalmente también por el desempeño de los trenes vecinos. Para una comprensión del fenómeno y del flujo de información de una escala a la otra se utilizarán datos de la Línea 1 del MXM.

Los métodos de regulación propuestos en este trabajo de tesis van enfocados a resolver dos problemas; en la escala global, el problema de la inestabilidad de los intervalos; y en la escala local, los retrasos en el proceso de ascenso y descenso en los vagones.

A continuación se dará un panorama general de la escala global y la relación entre los métodos de regulación.

2.1. Escala global. Regulación de los intervalos

El control del headway es un problema fundamental en la regulación de los STP [13], pueden servir de manera eficiente cuando los vehículos arriban a las estaciones en intervalos de tiempo regulares [14]; sin embargo la configuración de intervalos iguales, aunque deseable, es intrínsecamente inestable [9, 10]. En particular, el MXM es considerado como un sistema con altas frecuencias de headway debido a los pequeños valores que se manejan: alrededor de dos o tres minutos en condiciones normales. La inestabilidad de los intervalos se debe a que los trenes pueden ir más rápido o más lento de lo esperado y al cambio rápido de la demanda de pasajeros en las estaciones; como consecuencia, se presenta el fenómeno de la formación de cúmulos o *bus bunching* [15]. Por ejemplo, en el MXM en situaciones de sobresaturación de pasajeros se usa una estrategia de omisión de estaciones o *stop-skipping*; se habilita un tren vacío y se programa para llegar directamente a la estación saturada para servir a los pasajeros y mantener un headway estable ¹. Se han propuesto el uso de Algoritmos Genéticos para aplicar esquemas de omisión de estaciones [16], sistemas de información en tipo real con aprendizaje en línea [17], y para reducir el *bus bunching* modelos de predicción con máquinas de soporte vectorial [18] y tarjetas inteligentes de tránsito de datos [19]. Como se mencionó anteriormente, la sobresaturación promueve la inestabilidad de los intervalos; Li, *et al.* [20] proponen un método para predecir a corto plazo la afluencia de pasajeros y contribuir al establecimiento de medidas de control de sobresaturación de pasajeros.

Esto ha motivado el interés por regular a los STP desde una perspectiva adaptativa, tratando de mantener y aún más recuperar los intervalos iguales. Por ejemplo Bartholdi y Eisenstein [15] usan un esquema auto-ecualizado para generar un headway natural; Liang, *et al.* [21] proponen un método auto-adaptativo para ecualizar el headway usando información local; Daganzo [10] usa un control adaptativo con información en tiempo real del headway; Daganzo y Pilachowski [22] usan la cooperación entre vehículos para ajustar su velocidad crucero; y Andres y Nair [23] realizan una predicción del headway a través de datos reales y estrategias de espera para modular los intervalos. Una forma de estabilizar el headway es mediante

¹En la estación San Lázaro de la Línea 1 por las mañanas, se trata de enviar un tren vacío por cada tres con servicio regular, esto funciona bien por momentos, de otra forma el servicio colapsaría.

métodos adaptativos [9] o auto-organizantes [11]; en estos trabajos previos, se propusieron métodos de regulación para conservar y restaurar los intervalos usando simulaciones abstractas con tiempo y espacio discreto, y variables normalizadas tales como la velocidad y el flujo de pasajeros; se ha mostrado que el método auto-organizante puede ajustar los intervalos de espera en las estaciones a partir de información local; si el retraso aparece en el segmento interestación, el método auto-organizante puede corregir el headway cuando el tren arriba a la estación. Estos métodos pueden lograr un rendimiento supra-óptimo debido al efecto “lento es más rápido” [24]: los pasajeros pueden esperar más en las estaciones, pero una vez en el tren, probablemente lleguen más rápido a su destino ya que los trenes no tratan de mantener una configuración estricta de intervalos iguales.

En este trabajo de tesis se presentan dos métodos de regulación en la escala global para mantener y regular el headway. Se usa el tiempo de ascenso y descenso de pasajeros como una base común. La primera propuesta de regulación, a la que nos referimos como el Método General (GM) (Fig. 1A) modela la dinámica del headway del MXM a través de un conjunto de reglas de operación observables en el sistema real, como el tiempo mínimo y máximo de permanencia en la estación, el ascenso y descenso en vagones y un factor de retraso provocado por la afluencia y comportamiento de los pasajeros, en un contexto estático y global. La segunda propuesta, a la que nos referimos como el método Auto-organizante II o *Self-organizing II* (SOM-II) (Fig. 1B) está basado en un método previo Auto-organizante [11] (Fig. 1C) para regular de manera adaptativa, local y descentralizada el headway usando el concepto de *antiferomona* y el tiempo estimado de arribo del siguiente tren con un balance adecuado entre las variables para lograr la auto-organización.

El SOM-II puede reducir el headway a valores supra-óptimos como está estipulado en la desigualdad de la Eq. 1, ya que se adapta al flujo local de los pasajeros y tiene la capacidad de ahorrar tiempo en el viaje de los pasajeros evitando estacionamientos prolongados de los trenes en las estaciones.

$$headway_{SOM-II} \leq headway_{optimal} \leq headway_{real} \quad (1)$$

Se desarrolló una simulación computacional para probar el desempeño de ambos métodos de regulación, para este propósito se utilizó la modelación basada en agentes (MBA) [25] y el ambiente de programación NetLogo [26].

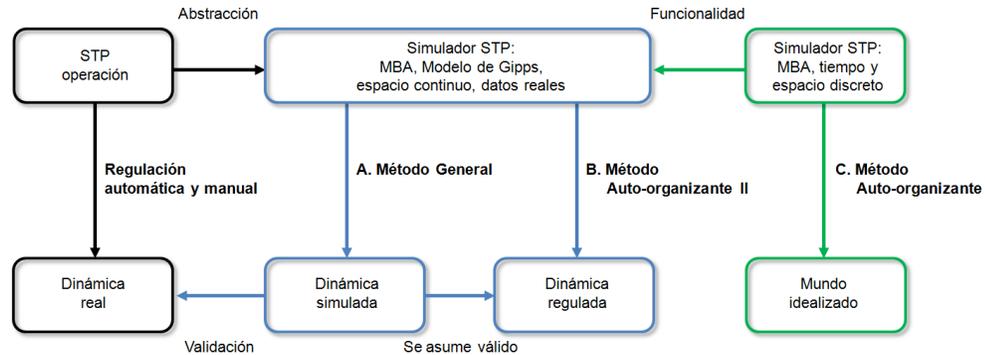


Figura 1: **Relación de métodos (A) General, (B) Auto-organizante II and (C) Auto-organizante original.** En este diagrama se representa la relación entre los métodos de regulación (azul), con los datos reales (negro) y con un escenario abstracto idealizado (verde).

Se utilizaron datos actuales de la Línea 1 del MXM para alimentar los parámetros de la simulación. Esta información se obtuvo de manera empírica mediante la recolección, registro y análisis de videograbaciones procesadas manualmente. La simulación computacional considera tres procesos generales; 1) la dinámica de los pasajeros, 2) el flujo de los trenes, y 3) los métodos de regulación.²

El modelo de flujo vehicular *car-following* de Peter Gipps [27], se adaptó para caracterizar el flujo de los trenes. Este modelo fue extendido con un sensor para identificar a los agentes en la línea de visión con el objetivo de modificar el comportamiento de los trenes adecuadamente. También se definió una distancia de seguridad entre los trenes y se implementó un mecanismo de frenado autónomo a través de la estrategia de “objeto fantasma” [28].

La simulación computacional apoya dos conclusiones generales: 1) que el Método General (Fig. 1A) muestra una correlación alta respecto a la dinámica observada en el Metro de la Ciudad de México; y 2) que el Método Auto-organizante II (Fig. 1B) tiene un rendimiento mejor que el Método General ya que conserva el headway en circunstancias normales y lo restaura

²El lector puede consultar el código fuente en la dirección <https://github.com/gcarreon/pts-simulator> y ver videos del desempeño en el canal de youtube <https://www.youtube.com/channel/UC5gGvoaX0cRtLyUqLPk-0TA>.

2.2 Escala local. Regulación del ascenso y descenso de pasajeros

en presencia de perturbaciones. Estos resultados sugieren que las mejoras obtenidas con el SOM-II podrían verificarse en caso de que se implementara en el Metro de la Ciudad de México.

2.2. Escala local. Regulación del ascenso y descenso de pasajeros

Aproximadamente en la década de los ochentas se realizó un estudio en el Sistema de Transporte Colectivo (STC) para probar distintos métodos de regulación de pasajeros en el ascenso y descenso. Se consideraron puertas exclusivas de entrada y de salida con diferentes asignaciones [29]. Se realizaron experimentos con personas reclutadas recreando circunstancias reales para analizar el comportamiento de los pasajeros en el interior del vagón y decidir sobre su posible implementación. La conclusión fue que sería complicada una implementación real.

En la actualidad, se han propuesto modelos y simulaciones computacionales para modelar el flujo de peatones [30–32]; en los STP se ha modelado el proceso de ascenso y descenso de pasajeros en vagones con autómatas celulares [33] y el flujo de pasajeros en las estaciones [34].

En el MXM, los retrasos que surgen en el ascenso y descenso son considerables debido a la saturación que presenta en horario pico. El retraso en el cierre de puertas consume de 15 a 25% del tiempo de abordaje [35] debido a las obstrucciones por parte de los pasajeros. La calidad del viaje disminuye drásticamente por los empujones, choques y fricciones entre los pasajeros.

A través de simulaciones computacionales se propone analizar dos escenarios para el ascenso y descenso; el primero, con puertas dedicadas de salida y entrada en los vagones; y el segundo, con señalamientos guía en plataforma. Para medir el desempeño de los métodos y comparar con datos empíricos se propone la medida *tiempo efectivo de ascenso y descenso* la cual proporciona el conteo de pasajeros que suben y bajan en función del tiempo considerando los flujos principales.



(A)



(B)

Figura 2: **Falta de regulación de pasajeros en la plataforma.** (A) Los pasajeros se posicionan enfrente de las puertas sin respetar los señalamientos del vagón “Antes de entrar permita salir”. (B) El flujo del interior choca con el del exterior provocando fricciones y empujones. Se generan retrasos importantes debido a una mala regulación en la plataforma, aún y cuando las densidades no son muy altas.

2.2 Escala local. Regulación del ascenso y descenso de pasajeros

El proyecto de investigación de la escala local nombrado como “Ascenso y descenso eficiente en vagones” resultó dentro de las propuestas ganadoras en la categoría de desarrollo de proyectos en el marco del *Primer Premio a la Innovación Tecnológica “Ing. Juan Manuel Ramírez Caraza” y al Concurso de Apoyos para el Desarrollo de Proyectos con Aplicación al Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México 2014* organizado por el Gobierno del Distrito Federal a través de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECITI) y el Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Durante el año 2015 se trabajó conjuntamente con el Área de Ingeniería de Operación de la Dirección de Transportación del STC para realizar el estudio sobre ascenso y descenso de pasajeros y obtener datos empíricos para alimentar las simulaciones computacionales; el estudio planteó la viabilidad de la implementación de un método de señalización para guiar a los pasajeros en el ascenso y descenso. En diciembre de 2016 se realizó el estudio piloto en la estación Balderas de la Línea 1 para regular los flujos de pasajeros a través de señalamientos guía en plataforma. En virtud de que los resultados de la intervención fueron positivos se hizo permanente el programa en dicha estación y actualmente se ha extendido a otras estaciones beneficiando a miles de pasajeros al día.

Este trabajo de tesis presenta la metodología, el análisis y los resultados obtenidos con las simulaciones computacionales, así como los resultados de la intervención en la estación Balderas.

Capítulo 3

Conceptos y modelos de sistemas de transporte público

En este capítulo se explicará la inestabilidad de intervalos iguales en los sistemas de transporte público (STP) y los modelos para desarrollar los métodos de regulación de la escala global. Se definirá el modelo de flujo vehicular *car-following* de Peter Gipps [27] y las extensiones que se realizaron para hacerlo más flexible y adecuarlo a nuestras necesidades. Se utilizará el método auto-organizante [11] para definir una nueva versión, el método auto-organizante II (SOM-II), para regular los intervalos de los trenes de manera adaptativa y el método general (GM) para modelar la dinámica del Metro de la Ciudad de México.

A continuación se explicará la importancia de la regulación de los intervalos entre trenes.

3.1. Los intervalos de los trenes

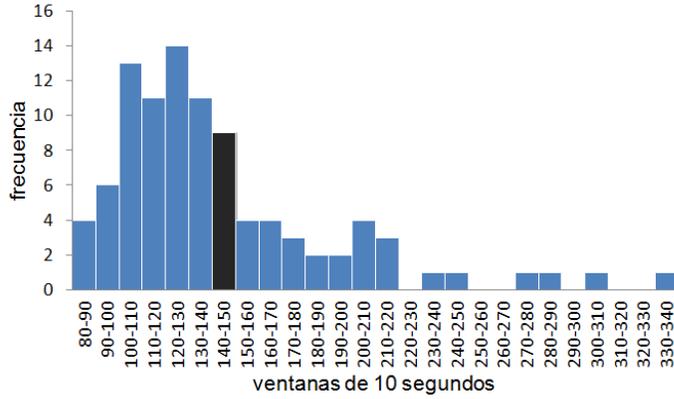
El intervalo de tiempo entre trenes, conocido como *headway*, puede ser considerado como una medida de desempeño del sistema. Para calcularlo se establece el punto de medición b , por ejemplo en una estación, y se registra la hora en la que parte el $tren_i$ de la estación; la diferencia de tiempos de partida del $tren_i$ y el $tren_{i+1}$ es el intervalo o headway.

$$H_{i,j}^b = hora_{tren_{i+1}} - hora_{tren_i}$$

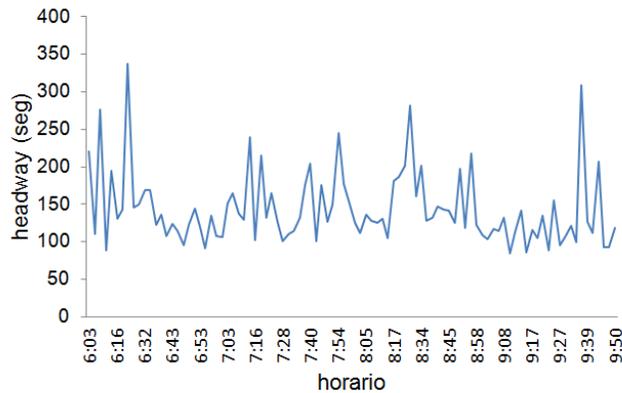
La forma óptima para dar servicio a los pasajeros es cuando los intervalos son iguales; es decir, cuando hay un método de regulación que permite tener una frecuencia de paso regular y constante; en caso contrario, existe la posibilidad de formación de cúmulos de trenes y como consencuencia un bajo desempeño del sistema.

Las *distribuciones del headway* definidas como histogramas de frecuencias de los intervalos de tiempo entre trenes, permiten tener una medida de desempeño en un intervalo de tiempo. Si los valores del headway son regulares, se observa una concentración en el histograma alrededor del intervalo más frecuente y se tienen colas casi nulas. Por el contrario, si el sistema presenta una regulación pobre, los histogramas tienen una dispersión importante y aparecen intervalos con valores altos. La distribución del headway se forma a partir de las mediciones realizadas en algún punto de la vía durante un periodo de tiempo razonable, por ejemplo, tres horas. En la Fig. 3 se muestra la distribución del headway y la serie de tiempo correspondiente de las mediciones realizadas en la estación Balderas de la Línea 1 el 26 de octubre de 2016 de 6:00 a 10:00 am. De acuerdo con el personal del Metro, el intervalo óptimo para la Línea 1 es de 120 a 125 segundos con una afluencia de pasajeros moderada y con el sistema funcionando correctamente, aunque no hay un documento oficial que respalde esta información.

Las distribuciones del headway se forman a partir de la construcción de ventanas de tiempo, ya que interesa mostrar las propiedades cualitativas más que cuantitativas. El histograma de la Fig. 3 muestra que la Línea 1 presenta una irregularidad importante en el paso de los trenes y la necesidad de métodos de regulación efectivos.



(A)



(B)

Figura 3: Mediciones del headway realizadas en la estación Balderas de la Línea 1 en horario de alta afluencia de 6:00 a 10:00 am. (A) La distribución está formada con 98 mediciones, muestra una dispersión grande respecto al intervalo óptimo y presenta una cola larga caracterizada por intervalos de más de 5 minutos, usualmente provocada por fallas y mal funcionamiento de la infraestructura y en ocasiones por el comportamiento de los usuarios. La frecuencia máxima se encuentra alrededor de 120-130 segundos, aunque la media está en 144 segundos, ilustrada con la barra en gris. (B) La serie de tiempo muestra la irregularidad del paso de los trenes en la estación.

3.2. Inestabilidad de intervalos iguales

Los usuarios se transportan eficientemente cuando los intervalos entre los trenes son iguales [14], sin embargo, esta configuración es inestable [9]. Las causas por las que el intervalo se pierde son que el tren va más rápido o más lento de los esperado, y la alta variación del flujo de pasajeros por unidad de tiempo. Las variables que pueden influir en el comportamiento del headway son el número y velocidad de los trenes, el horario, la afluencia de pasajeros en las estaciones, el proceso de ascenso y descenso y las fallas mecánicas. En la Fig. 4 se ejemplifica una situación donde se pierden los intervalos iguales; se asume que la velocidad de los trenes es constante, que la afluencia de pasajeros es distinta en cada estación y que no existe un mecanismo de regulación en la estación o en el segmento inter-estación; los trenes suben a los pasajeros y parten de la estación sin mantener un tiempo mínimo o máximo de espera.

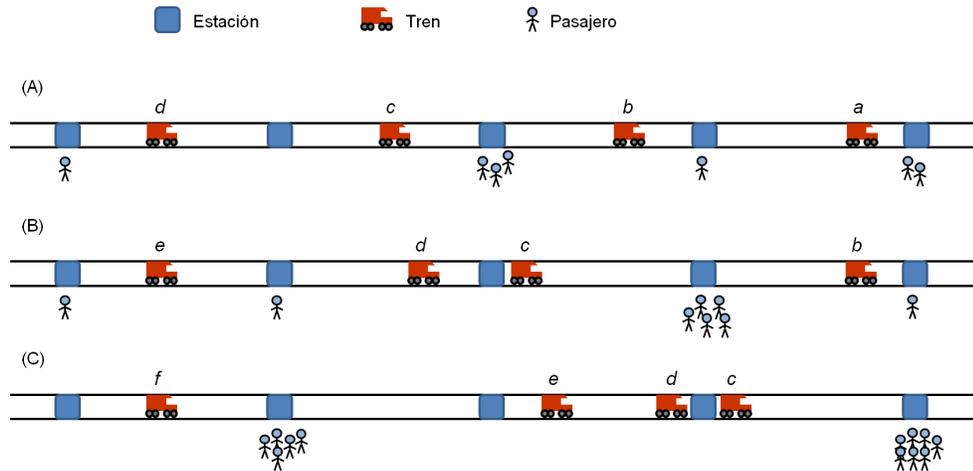
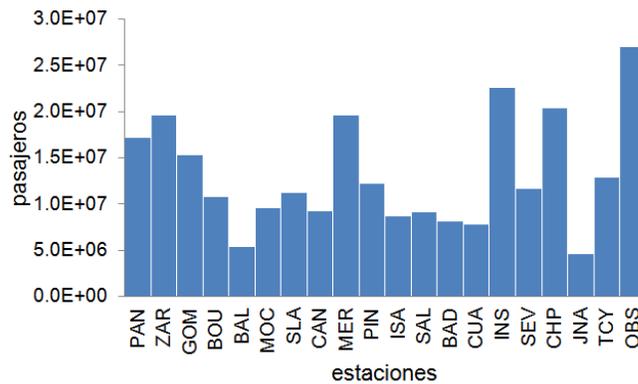
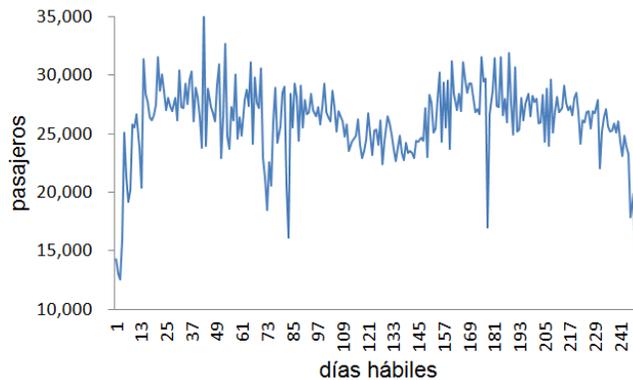


Figura 4: **Ejemplo ilustrativo de la inestabilidad del headway.** (A) Se inicia con una configuración de intervalos iguales y segmentos interestación homogéneos entre estaciones, se hace notar que el tren *a* llegará primero a la estación que el tren *b* y los subsecuentes. (B) Existen estaciones con más afluencia que otras, como consecuencia los intervalos entre los trenes se acortan o alargan, como sucede con los trenes *b* y *c*, y *c* y *d* respectivamente. (C) Se forman cúmulos de trenes (*c*, *d* y *e*) y empiezan a saturarse las estaciones que no han sido alcanzadas recientemente.

Uno de los factores por lo que se pierde el intervalo es por la variabilidad de la afluencia de pasajeros; por ejemplo, la Fig. 5 muestra la afluencia de pasajeros en la Línea 1 durante el año 2014 por estación¹. Es indispensable proponer soluciones desde una perspectiva adaptativa ya que el fenómeno cambia rápidamente.



(A)



(B)

Figura 5: **Número de usuarios de la Línea 1 en el año 2014.** (A) La variabilidad de afluencia depende de la estación. El número total de usuarios en la Línea 1 fue de 263,708,660. (B) Serie de tiempo de afluencia por día hábil en la estación Balderas.

¹Gráficas realizadas con datos de la Dirección de Ingeniería y Desarrollo Tecnológico, Sistema de Transporte Colectivo.

3.3. Modelo de Gipps

El modelo de flujo vehicular *car following* de Peter Gipps² [27] fue desarrollado en 1981 con el uso de mediciones empíricas realizadas en segmentos de carreteras; tiene como característica principal permitir que el conductor establezca su máximo frenado, su velocidad máxima deseada y su aceleración. Se ha utilizado en diferentes suites dedicadas al estudio y la simulación de sistemas de transportes como MULTISIM, AIMSUN, SISTM, SIGSIM y SITRAS [28], ha sido comparado con otras suites como MITSIM, VISSIM y Paramics [36]. También se ha analizado la estabilidad del modelo [37], y se han realizado análisis del espacio de parámetros [38]. Se menciona que existen propiedades por estudiar del modelo [28, 38, 39]. La calibración del modelo se ha realizado por medio de búsqueda sistemática en el espacio de parámetros [40] o por recolección de datos individuales por medio de dispositivos como un *laser rangefinder* [41].

El modelo considera tiempo discreto y espacio continuo. La ecuación para calcular la velocidad en el tiempo $t + \tau$ es:

$$u_n(t + \tau) = \min\{G_a(t), G_d(t)\}, \quad (2)$$

$$G_a(t) = u_n(t) + 2,5a_n\tau(1 - u_n(t)/V_n)\sqrt{0,025 + u_n(t)/V_n}, \quad (3)$$

$$G_d(t) = b_n\tau + \sqrt{b_n^2\tau^2 - b_n(2(x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)) - u_n(t)\tau - u_{n-1}(t)^2/\hat{b})}, \quad (4)$$

donde

- $u_n(t)$ es la velocidad del vehículo n al tiempo t ,
- a_n es la máxima aceleración a la cual el conductor del vehículo n desea tomar,
- τ es el tiempo de reacción y es constante para todos los vehículos,
- V_n es la velocidad a la cual el conductor del vehículo n desea viajar,

²En el literatura se le conoce como Modelo de Gipps

- b_n es el frenado más severo que el conductor del vehículo n puede hacer ($b_n < 0$),
- $x_n(t)$ es la ubicación del vehículo n al tiempo t , de la misma manera
- $x_{n-1}(t)$ es la posición del tren actual,
- S_n es el tamaño efectivo del vehículo n , y
- \hat{b} es el valor de b_{n-1} estimado por el conductor del vehículo n .

Las ecuaciones Eq. 3 y 4 representan la aceleración y desaceleración respectivamente, estas son comparadas para actualizar la nueva velocidad $u_n(t + \tau)$ de acuerdo a la distancia del objeto que está enfrente. La actualización de la posición del vehículo n al tiempo $t + \tau$ es,

$$x_n(t + \tau) = x_n(t) + 0,5(u_n(t) + u_n(t + \tau))\tau. \quad (5)$$

El tiempo de reacción del conductor descrito por τ , se establece comúnmente en 2/3 de segundo. El valor del tiempo de actualización del simulador se toma a partir de este parámetro.

A continuación se describen las extensiones en el modelo de Gipps para el simulador de sistemas de transporte público.

3.4. Modelo de Gipps Extendido

En este trabajo de tesis, se desarrollo un simulador de STP con una extensión del modelo de Gipps para caracterizar el flujo de los trenes con tres adecuaciones principales: 1. Una línea de visión que permite al tren identificar a los agentes de adelante que pueden ser trenes o semáforos; 2. Una distancia de seguridad entre trenes y; 3. Un frenado autónomo implementado con la estrategia de “objeto fantasma” [28]. Estas extensiones aportan mayor flexibilidad y autonomía al modelo con la ventaja de conservar las ecuaciones originales del modelo sin modificar sus propiedades cualitativas fundamentales.

3.4.1. Extensión 1: Línea de visión

Se definió un nuevo parámetro llamado línea de visión, el cual permite identificar a los trenes o semáforos que están adelante. Si el objeto se encuentra dentro de la línea de visión se procede a calcular la distancia para decidir el comportamiento del tren (Fig. 6); por ejemplo, si enfrente hay un tren se aplica la ecuación Ec. 2, si hay un semáforo en estado verde o rojo se aplica la ecuación Ec. 3 o Ec. 4 respectivamente. Si hay un tren y un semáforo en la línea de visión se considera la mínima distancia hacia el objeto. Si no se encuentra ningún agente, se considera la ecuación Ec. 3.

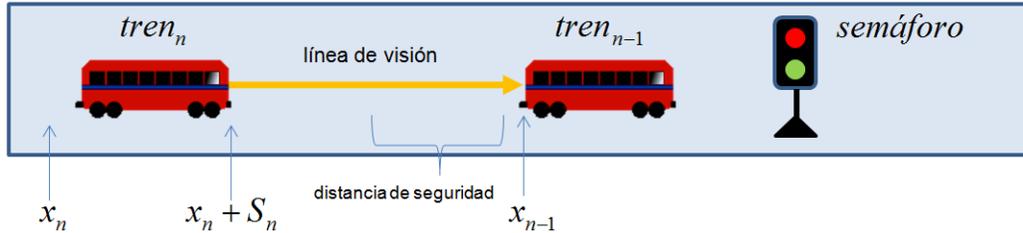


Figura 6: **Agentes en la línea de visión y distancia de seguridad.** El alcance de la línea de visión se establece a partir de la coordenada inicial $x_n + S_n$ hasta el valor establecido en la simulación, por ejemplo, 1500 metros. Si en este rango se encuentra algún agente se procede a calcular alguna de las ecuaciones del modelo de Gipps. Esta es una estrategia eficiente porque en la mayoría de los casos no es necesario calcular la aceleración (3) y la desaceleración (4) simultáneamente. La distancia de seguridad es el espacio que existe entre los trenes y no está permitido sobrepasarla.

3.4.2. Extensión 2: Distancia de seguridad

Se definió una distancia de seguridad que permite a los vehículos no quedar exactamente uno tras de otro como lo hacen en el modelo original (Fig. 6). En los STP dejar esta distancia es una regla operacional fundamental de seguridad. La expresión para calcular la distancia entre agentes forma parte de la ecuación de desaceleración (4), toma la siguiente forma:

$$x_{n-1} - (safedistance + S_n + x_n). \quad (6)$$

La distancia de seguridad puede ser vista como un incremento del tamaño efectivo del tren S_n para modelar el espacio entre los trenes. Este permanece constante para todos los trenes y el valor del parámetro es igual a la longitud del tren, es decir, 150 metros.

3.4.3. Extensión 3: Frenado autónomo

Para simular un frenado autónomo y no modificar el modelo original se usó la estrategia de *objeto fantasma*, que consiste en colocar un objeto de longitud cero, $S = 0$, en la posición x_{n-1} al tiempo t para que el tren lo detecte e inicie el frenado. La colocación del objeto fantasma debe ser la adecuada ya que el tren podría transitar más de lo debido y no frenar donde se desea (ver Fig. 7).

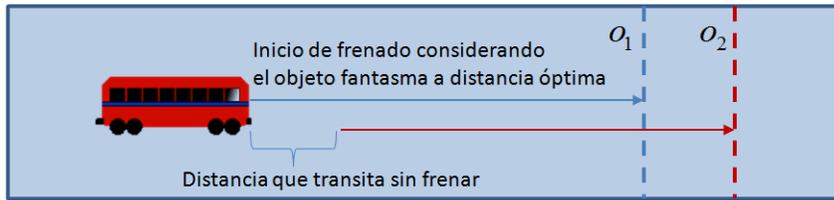


Figura 7: **Estrategia de objeto fantasma colocado en la posición óptima.** La colocación del objeto fantasma O_1 en una posición que no es la adecuada (i.e. O_2) puede causar que el frenado no sea instantáneo. A priori se calcula una tabla de distancias óptimas para realizar el frenado autónomo.

Para tener la posición exacta de colocación del objeto fantasma y simular un frenado instantáneo se exploró exhaustivamente el comportamiento de frenado a partir de dos componentes; la intensidad de frenado b y la velocidad deseada V . Para cada par de parámetros, se colocó un tren con velocidad deseada V y un objeto en estado de reposo lo suficientemente alejados uno de otro; el tren aplica la ecuación de aceleración (Ec. 3) al inicio y mantiene la velocidad deseada V ; en el momento que encuentra el objeto fantasma se aplica la ecuación de desaceleración (Ec. 4) y se registra la distancia entre el tren y el objeto. El pseudocódigo se muestra en el Cuadro 1 y el cálculo del espacio de parámetros (inicio-de-frenado, velocidad-deseada) en la Fig. 8.

```

1.  ForEach parámetros  $(b, V)$  en un rango establecido
2.      set  $u_{tren}(t) = V$ 
3.      While  $d_{optima}$  not set
4.          If  $G_b(t) \leq G_a(t)$ 
5.               $d_{optima} = distancia(x_{tren} + S_{tren}, x_{objetofantasma})$ 
6.          EndIf
7.               $u_{tren}(t + \tau) = \min\{G_a(t), G_d(t)\}$ 
8.      EndWhile
9.      set  $espacio(b, V) = d_{optima}$ 
10. EndForEach

```

Cuadro 1: Pseudocódigo para calcular el espacio *inicio-de-frenado*, *velocidad-deseada*

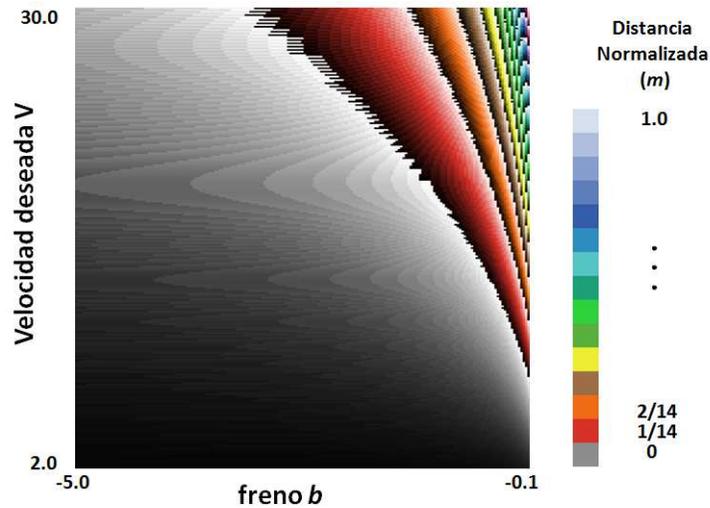


Figura 8: Representación gráfica del espacio de parámetros *inicio-de-frenado*, *velocidad-deseada*. Se muestra el resultado de 54,880 experimentos, a cada punto se le asigna un color en relación a la distancia inicial de frenado. La gama de colores está normalizada a 1.0, por ejemplo, la zona en gris corresponde a las distancias más cortas, y las azules a las distancias más largas.

La mínima distancia reportada es 2.74 metros, que corresponde al caso extremo donde la potencia de frenado es muy grande, es decir, cerca del valor

$b=-5.0 \text{ m/s}^2$ y la velocidad deseada muy pequeña cerca de $V=2.0 \text{ m/s}^2$; en el otro extremo, si el frenado es suave y la velocidad deseada alta se necesitan cerca de 2275 metros (zonas en morado). Por ejemplo, si el tren viaja a $V=20 \text{ m/s}$ y tiene una intensidad de frenado $b=-1.0 \text{ m/s}^2$ el objeto fantasma debe colocarse a una distancia de 208 metros enfrente del tren para que inicie el frenado inmediatamente.

Esta funcionalidad, además de permitir el frenado en cualquier momento, ofrece la posibilidad de cambiar la velocidad deseada V_n que se establece como parámetro constante en el modelo.

Esta extensión se utiliza para realizar perturbaciones puntuales en el sistema para mostrar como los métodos de regulación responden bajo diferentes circunstancias; por ejemplo, se puede simular una falla mecánica de un tren disminuyendo la velocidad máxima deseada o realizar alto total por un periodo de tiempo.

3.4.4. Parámetros del modelo

Las características física del flujo de los trenes, como la aceleración, frenado, velocidad deseada y dimensiones pueden ser establecidas en el modelo a través de valores que se obtienen empíricamente y de la infraestructura; por ejemplo, la dimensión de los trenes en el MXM es de $S_n = 150$ metros; sin embargo, hay otros que no se pueden instanciar directamente como la aceleración a_n y el frenado b_n ya que consideran otra escala. Por tal motivo se realizó un cálculo de espacio de parámetros *aceleración, velocidad-deseada y frenado, velocidad-deseada*.

Para calcular el espacio *frenado, velocidad-deseada* se utilizó la metodología de la sección anterior (ver Cuadro 1), se añadió un contador de las evaluaciones de la ecuación de frenado (Ec. 4) para calcular el tiempo requerido para hacer alto total desde la velocidad deseada V (ver Cuadro 2).

Por otro lado, en el Cuadro 3 se muestra el pseudocódigo para calcular el espacio de parámetros *aceleración-velocidad deseada*.

Se calcularon los espacios de parámetros con los pseudocódigos del Cuadro 2 y 3. El resultado se muestra en la Fig. 9(A) frenado y 9(B) aceleración. Los rangos en decenas de segundos están identificados con colores (ver la

1.	ForEach parámetros (b, V) en un rango establecido
2.	set $u_{tren}(t) = V$
3.	set $counter = 0$
4.	While $u_{tren}(t) \neq 0$
5.	If $G_b(t) \leq G_a(t)$
6.	$counter + = \tau$
7.	EndIf
8.	$u_{tren}(t + \tau) = \min\{G_a(t), G_d(t)\}$
9.	EndWhile
10.	set $espacio(b, V) = counter$
11.	EndForEach

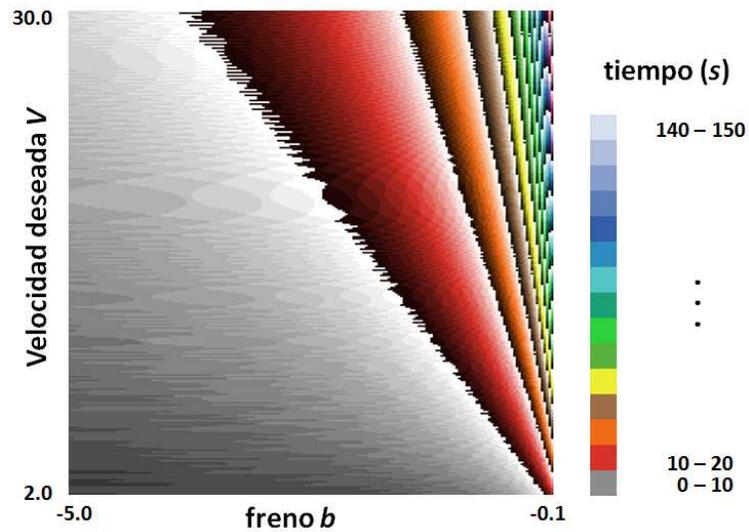
Cuadro 2: Pseudocódigo para calcular el espacio *frenado*, *velocidad-deseada*.

1.	ForEach parámetros (a, V) en un rango establecido
2.	set $u_{tren}(t) = 0$
3.	set $counter = 0$
4.	While $u_{tren}(t) \neq V$
5.	$counter + = \tau$
6.	$u_{tren}(t + \tau) = G_a(t)$
7.	EndWhile
8.	set $espacio(b, V) = counter$
9.	EndForEach

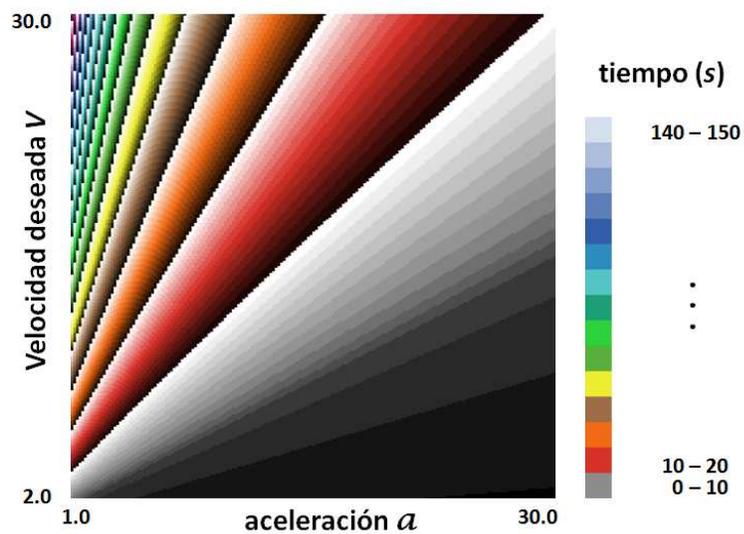
Cuadro 3: Pseudocódigo para calcular el espacio *frenado - velocidad deseada*.

escala); por ejemplo, los valores que se encuentran en rojo representan una combinación de parámetros donde se invierten de 10 a 20 segundos en realizar el proceso. A partir de la escala de colores se observa que el comportamiento de la aceleración es más estable y los rangos se separan sin perturbaciones. Respecto al espacio de frenado, las zonas no están finamente delimitadas debido a que éste se inicia a partir del tiempo de reacción τ .

Con los cálculos de los espacios de parámetros se pueden encontrar valores adecuados de la aceleración a y del frenado b que representen el rendimiento de los trenes reales de los STP. La ecuación *aceleración = velocidad/tiempo*



(A)



(B)

Figura 9: **Espacio de parámetros respecto a la velocidad deseada V .** (A) Frenado. (B) Aceleración. La gama de colores indica el tiempo empleado.

permite realizar un mapeo de los valores obtenidos empíricamente hacia los valores de los parámetros. Por ejemplo, las especificaciones de los trenes del

MXM [42] reportan una aceleración de 1 m/s^2 el cual se ajusta cuando $a=3.8 \text{ m/s}^2$.

En el Cuadro 4 se muestran los parámetros utilizados para la Línea 1 del MXM. El tiempo de reacción τ y el frenado estimado del tren delantero se estableció de manera estándar; la aceleración y el frenado se establecieron a partir de los espacios de parámetros; la máxima velocidad se estableció con medidas empíricas realizada en la Línea 1; el tamaño del tren y la distancia de seguridad se establecieron con especificaciones técnicas y la línea de visión por el tamaño promedio entre estación y estación.

Cuadro 4: Parámetros del Modelo de Gipps extendido considerando las propiedades de los trenes del MXM.

Descripción y valores empíricos	Valores de los parámetros
Tiempo de reacción	$\tau = 2/3 \text{ s}$
Tamaño del tren (147.6 m)	$S_n = 150 \text{ m}$
Distancia de seguridad	$safedistance = 150\text{m}$
Línea de visión	$lineofvison = 1500\text{m}$
Máxima velocidad (comercial, 36 km/h; máxima, 80 km/h)	$V_n = 13 \text{ m/s}$
Aceleración (con tren cargado a $\frac{3}{4}$, 1.0 m/s^2)	$a_n = 3.8 \text{ m/s}^2$
Frenado (desaceleración de servicio a $\frac{3}{4}$, 1.0 m/s^2)	$b_n = -1.15 \text{ m/s}^2$
Frenado estimado del tren delantero	$\hat{b} = \min\{-3.0, (b_n - 3.0)/2\} \text{ m/s}^2$ (se establece de manera estándar)

3.5. Método auto-organizante para regular los intervalos

La afluencia de pasajeros es un factor importante para considerar en las estrategias de regulación de los STP. Las estrategias definidas en un contexto estático, donde no se consideran los cambios de afluencia de pasajeros, posiblemente solo funcionarán en ciertos rangos. En el presente trabajo de tesis, se usa el método auto-organizante o *self-organizing method* (SOM) propuesto por Gershenson [11] como base para regular los intervalos entre trenes. En la propuesta original se utilizan autómatas celulares³ y variables normalizadas en tiempo y espacio discreto; se muestra que es posible regular estos intervalos más allá del óptimo teórico ya que responde de manera adaptativa a las condiciones locales como la afluencia de pasajeros y tiempos de espera del tren. Esto es posible por el efecto “lento es más rápido” [24], los pasajeros tienden a esperar más en las estaciones pero una vez en el tren los tiempos totales de viaje se verán reducidos.

El SO está inspirado en la estigmergia [45, 46], comunicación a través del ambiente de insectos sociales. Por ejemplo, las hormigas, a través de la segregación de feromonas, pueden realizar tareas que se consideran colectivas a partir de información local y de manera descentralizada, como la recolección de su alimento. En el SO sucede algo semejante, el ambiente despiden una “sustancia” que va en aumento conforme pasa el tiempo, específicamente, este incremento de información se realiza en la estación y es borrada o disipada por el paso del tren, esta sustancia es llamada *antiferomona*. Esto permite tener conocimiento del tiempo transcurrido desde que transitó el último tren. Es conveniente tener esta información en cada parte del trayecto porque se pueden definir estrategias de regulación con base en los tiempos transcurridos. Por ejemplo, si encontramos una fuerte concentración de antiferomona en la estación indica que hace tiempo que el último tren partió entonces se puede restringir el tiempo de permanencia y partir a velocidad máxima.

El método de control para los trenes en las estaciones se muestra en la Fig. 10. Los trenes avanzan sobre la vía a velocidad constante, cuando llegan a la estación entonces se ejecuta el SO. Como primera instrucción,

³Un autómata celular es un sistema dinámico discreto donde cada elemento del espacio es actualizado por una función de transición, para definiciones véase [43, 44].

salen los pasajeros del tren, el cual es modelado con una proporción de tiempo equivalente a la cantidad de pasajeros que desean bajar. Después, se hace una verificación de la cantidad de pasajeros μ en la plataforma. Si la variable μ es mayor al tiempo máximo permitido μ_{max} entonces lo acotamos como $\mu = \mu_{max}$ en otro caso verifica la concentración de antiferomona. El mecanismo para que el tren parta de la estación esta dado por el balance entre la variable antiferomona, la distancia del tren adyacente trasero y la cantidad de pasajeros μ ; estas comparaciones son válidas ya que las variables están normalizadas, es decir, por unidad de tiempo, avanza un tren, baja o sube un pasajero y crece la antiferomona. Si se cumple la comparación de la antiferomona el tren parte de la estación, si no es así, abordan pasajeros hasta que quede vacía la plataforma o se cumpla la comparación de la antiferomona.

En cada estación se aplica el SO; localmente se adapta el tiempo de espera a partir de la distancia de los trenes vecinos y la cantidad de pasajeros en la plataforma, de manera global se logra que el headway se adapte a estos cambios y se incremente el desempeño del sistema más allá del óptimo teórico.

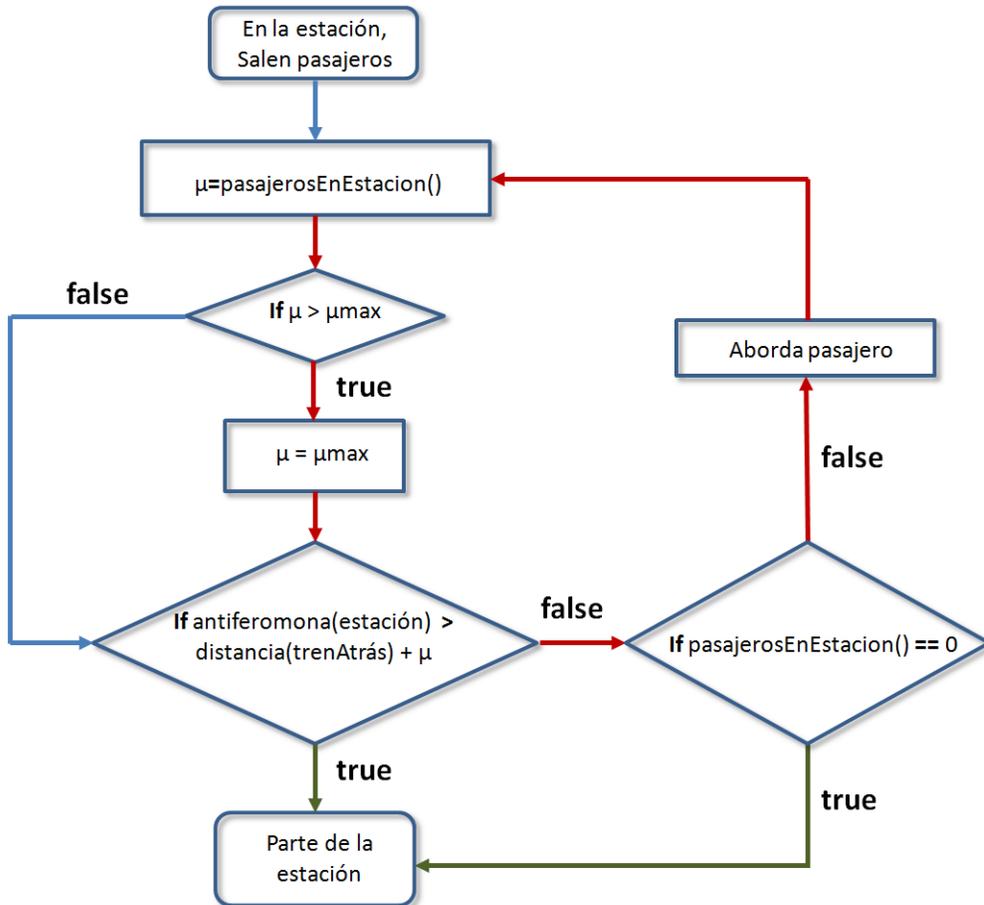


Figura 10: **Diagrama de flujo para el SO.** El ciclo de ascenso de pasajeros se muestra con las flechas en rojo, las flechas en verde muestra los casos en los que parte el tren de la estación. El ascenso y descenso se encuentran separados, lo que implica un mecanismo de regulación extra en la plataforma para el ascenso y descenso.

A continuación se definirá el modelo de regulación general para el simulador de STP propuesto en este trabajo de tesis.

3.6. Modelo de regulación para STP

El modelo de regulación de los STP está constituido por dos partes; en la primera se regula la dinámica de los trenes en la estación y tiene dos métodos: 1) el Método General (GM), y 2) el Método Auto-organizante II (SOM-II); la segunda es el modelo de Gipps extendido o Gipps extended model (GEM) para caracterizar la dinámica de los trenes en movimiento y para interactuar con los agentes del entorno. El Cuadro 5 muestra el pseudocódigo de control principal del simulador.

```

1.  iteration ← 0
2.  While (iteration ≤ iterationmax)
3.      ForEach tren
4.          If tren en la estación
5.              run método de regulación (GM o SOM-II)
6.          Else
7.              run Modelo extendido de Gipps
8.          EndIf
9.      EndFor
10.  iteration ← iteration + 1
11. EndWhile

```

Cuadro 5: Pseudocódigo del control principal del simulador.

Los dos métodos de regulación comparten el proceso de arribo del tren y el de ascenso-descenso de pasajeros como se ilustra en la parte superior (en azul) de la Fig. 11. Este bloque inicia con el arribo del tren, el cual se detiene en la estación debido a un semáforo en estado rojo. Cada vez que un nuevo pasajero se introduce en la simulación se crea un registro de su estación origen y destino a partir de una distribución de probabilidades de la afluencia promedio en las estaciones; este trayecto se calcula a priori con información empírica. Cada tren tiene un vector de control donde se lleva el registro de las estaciones recorridas por pasajero; cuando el tren arriba a la estación se identifican los pasajeros que han cumplido su recorrido para disponerse a bajar.

En cada estación se calcula el tiempo estimado de ascenso-descenso, *ETAbord*, a partir de la cantidad de pasajeros que bajan y los que están

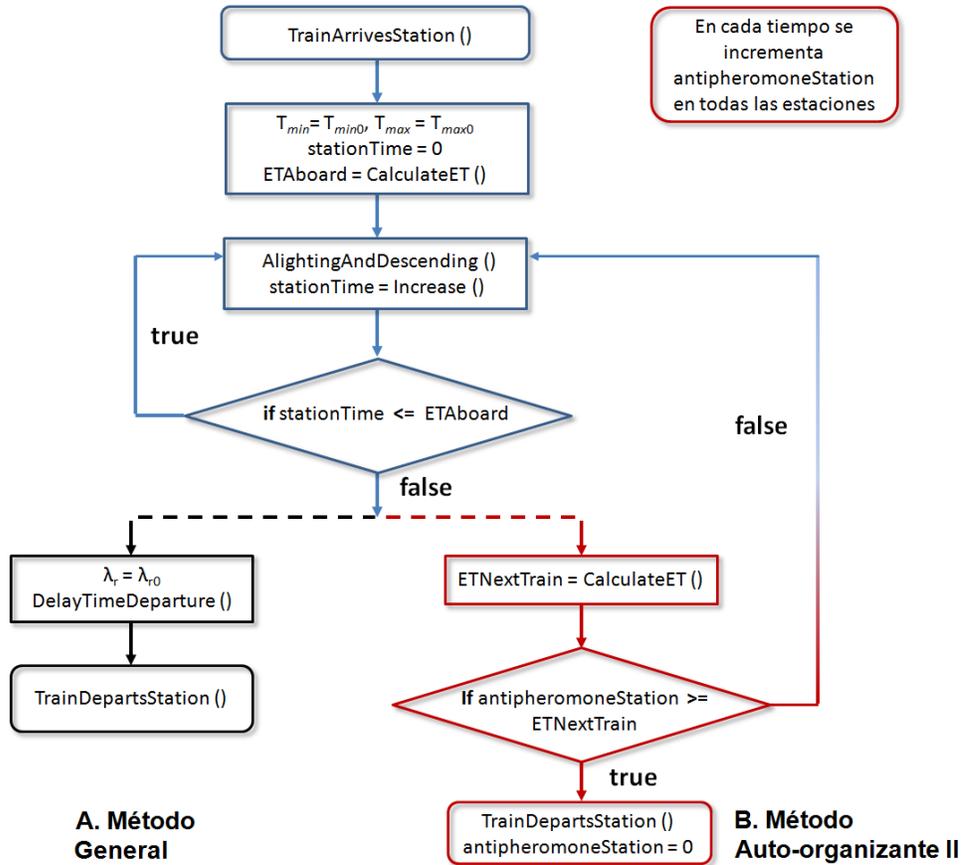


Figura 11: Diagrama de flujo general. (A) Método General (negro). (B) Método Auto-organizante II (rojo). Los procedimientos en común están marcados en azul.

en plataforma para subir. $ETABoard$ está acotado por el tiempo mínimo y máximo de espera del tren en la estación, $T_{min} \leq ETABoard \leq T_{max}$; las cotas se establecen de manera global con valores obtenidos de forma empírica. Por ejemplo, si no hay pasajeros que bajen o suban, el tren permanecerá en la estación el tiempo T_{min} , y en el otro extremo, si hay una gran saturación el tren permanecerá como máximo T_{max} . El módulo *AlightingAndDescending* modela el flujo de ascenso y descenso de pasajeros a una tasa de 1 pasajero por segundo; este valor se estableció de acuerdo a observaciones empíricas. El ciclo de ascenso y descenso termina cuando se cumple el tiempo estimado

ETABoard. La salida del tren de la estación queda determinada por el método de regulación establecido, ya sea el GM (lado derecho) o el SOM-II (lado izquierdo) (Fig. 11A y 11B).

3.6.1. Método General

La dinámica del Método General (GM) está regido por el tiempo de estacionamiento o *dwell time* definido como la suma de ascensos y descensos de pasajeros en la estación k con una tasa constante [47] acotado por el tiempo mínimo de espera T_{min} , el máximo T_{max} y un factor de retraso que sigue una distribución Poisson con media λ_r , el cual representa efectos potenciales de sobresaturación. Otros estudios consideran dentro de las variables métodos de pago [48] y conteo automático de pasajeros y posición automática de vehículos [49], pero en el MXM el método de pago se encuentra en las entradas de la estación y no está disponible el conteo automático de pasajeros.

Una vez terminada la parte común de ascenso-descenso (ver Fig. 11) se establece el factor de retraso, como se define en la rama inferior izquierda (en negro) de la Fig. 11A. El procedimiento *DelayTimeDeparture* retrasa la partida y *TrainDepartsStation* cambia el semáforo de la estación a verde y el tren parte de la estación. Posteriormente, el semáforo cambia a estado rojo para recibir al tren siguiente. Con valores adecuados de los parámetros T_{min} , T_{max} y λ_r se puede modelar la dinámica del MXM estableciendo el headway como parámetro de desempeño.

3.6.2. Método Auto-organizante II

Por su parte el Método Auto-organizante (SOM-II) regula de manera adaptativa el tiempo del tren en la estación. Usa el concepto de antiferomona (Gershenson, 2011), inspirado en la comunicación de los insectos sociales a través del ambiente (Theraulaz, 1999; Bonabeau, 1999). La antiferomona se representa mediante una variable local para cada estación; tiene un valor de cero cuando inicia la simulación y se incrementa a razón de 2/3 de segundo por iteración ya que coincide con el tiempo de actualización del modelo de Gipps (parámetro de reacción del conductor); de esta manera están sincronizados los tiempos en la simulación. Se vuelve a inicializar a cero cada vez que el tren parte de la estación; por lo mismo este valor representa el tiempo transcurrido desde que el tren anterior partió. Esta variable se ilustra

con el bloque de arriba a la derecha (en rojo) de la Fig. 11. El procedimiento para calcular su valor se muestra en el pseudocódigo del Cuadro 6.

```

1.  ForEach estación
2.      If tren aquí and parte de la estación
3.          antiferomona  $\leftarrow$  0
4.      Else
5.          antiferomona  $\leftarrow$  antiferomona + tasaDeCrecimiento
6.      EndIf
7.  EndFor

```

Cuadro 6: **Pseudocódigo de la actualización de la variable antiferomona.** La tasa de crecimiento se establece como el tiempo de paso de la simulación, en este caso $2/3$ de segundo.

El mecanismo para decidir si el tren en la estación parte o se queda está sujeto al resultado de la comparación entre el valor de la antiferomona y el tiempo estimado de arribo del tren siguiente, $ETNextTrain$, el cual se muestra en la parte inferior derecha (en rojo) de la Fig. 11. El valor de este parámetro se calcula con base a la distancia entre los trenes T_{n-1} y T_n , lo cual se mide mediante un sensor, y la velocidad promedio del tren T_n , tomando las últimas k iteraciones, es decir,

$$ETNextTrain(t) = d(x_n(t), x_{n-1}(t)) / \bar{v}_n(t, k), \quad (7)$$

donde $d(x_n(t), x_{n-1}(t))$, es la distancia euclidiana al tiempo t entre la posición x_{n-1} del tren T_{n-1} ubicado en la estación y la posición x_n del tren T_n siguiente; $\bar{v}_n(t, k)$ es la velocidad promedio del tren T_n durante las últimas k iteraciones en función del tiempo t . Cuando el valor de la antiferomona es mayor o igual a $ETNextTrain$ se cumple la condición de salida, el tren parte de la estación y la antiferomona es inicializada a cero. El balance entre estas dos variables hace posible que el tren conserve y restaure el headway de manera descentralizada usando información local, y además, se adapta a cambios que surgen en el sistema.

El comportamiento se puede resumir en dos casos principales: 1) cuando el valor de la antiferomona es alto y el de $ETNextTrain$ es bajo, indica que el tren de adelante partió hace tiempo y el tren de atrás está próximo a

llegar, por tal motivo, el tren en la estación puede partir; 2) si el valor de la antiferomona es bajo y *ETNextTrain* es alto, el tren en la estación espera lo suficiente hasta que el tren de atrás este próximo a llegar. En el video <https://youtu.be/1AS9dWdr6kk> se muestra un experimento de la regulación del headway aplicando el SOM-II; se inicia con una configuración de trenes acumulados uno tras otro y finaliza con una distribución de trenes equitativa sobre el sistema.

3.7. Discusión

En este capítulo se definieron los elementos esenciales para desarrollar el simulador de STP. En primer lugar, está el Modelo Extendido de Gipps (MEG), en el cual se realizaron tres adecuaciones importantes sin modificar el modelo original y que no están reportadas en la literatura, además se realizó un estudio minucioso del espacio de parámetros para encontrar los valores adecuados de los parámetros, y así, ajustarse a la dinámica actual del MXM con base en datos empíricos. El MEG permite definir la dinámica de los trenes en el segmento interestación y en el arribo a la estación; la extensión *línea de visión* permite definir reglas adecuadas de operación frente a distintos tipos de agentes (en este caso semáforos y estaciones). La extensión del frenado autónomo con cambio de velocidad deseada aporta mayor flexibilidad; para efectos de este trabajo, se podrán definir fallas mecánicas de manera puntual o eventos donde se tenga que reducir la velocidad de manera propia y sin depender del tren de enfrente.

Por otro lado, la dinámica en la estación está definida por los métodos de regulación. El GM que usa variables estáticas y globales para definir el tiempo de estacionamiento y el SOM-II que utiliza información de los trenes vecinos y la cantidad de pasajeros en la estación para adaptarse a las condiciones locales.

En el siguiente capítulo se mostrarán los detalles de la simulación computacional y el rendimiento de los métodos de regulación aplicados al modelo de la Línea 1 del MXM.

Capítulo 4

Simulación de sistemas de transporte público

En este capítulo se mostrará el rendimiento de los métodos de regulación con dos resultados importantes; el primero, es que el Método General (GM) correlaciona de manera alta con los datos empíricos recabados en el Metro de la Ciudad de México (MXM); y el segundo, es que el Método Auto-organizante II (SOM-II) es capaz de regular los intervalos de manera adaptativa, de la misma manera puede recuperar y conservar los intervalos después de una falla mecánica. Para medir el rendimiento se propone la tasa de arribo de los pasajeros como variable de control; se muestra que el SOM-II es mejor que el GM en los casos de saturación importante. Se presentan los controles de la simulación y su funcionalidad.

4.1. Elementos y características de la simulación

La modelación basada en agentes (MBA) y los sistemas multi-agentes (SMA) se han utilizado para proponer soluciones a problemas reales de transporte y movilidad [50–52]. Son una herramienta para analizar posibles escenarios de forma cualitativa y cuantitativa. La MBA permite hacer la abstracción de los elementos constituyentes del sistema de forma explícita a través del enfoque *bottom-up*. Están conformados por un entorno o medio, por un conjunto de agentes heterogéneos y por sus interacciones. Los agentes tienen la propiedad de reaccionar a su ambiente y pueden adaptarse a los

cambios, se definen relaciones entre los agentes y su medio a partir de conjuntos de reglas o heurísticas [53, 54]. La MBA es conveniente para modelar sistemas con un gran número de componentes y estudiar sus interacciones como sucede en los STP. La simulación computacional utiliza la MBA para lograr dos cosas, la modelación de la Línea 1 del MXM y la interacción de los trenes con el medio a través de los métodos de regulación (GM y SOM-II).

La simulación computacional alimentada con datos reales del MXM considera aspectos relevantes de la dinámica, como tiempos mínimos de espera de los trenes, reglas frente a las luces del semáforo, distancias de seguridad entre trenes, funciones de probabilidad de arribo de pasajeros, tamaño de los segmentos interestación, número de estaciones, etc. Uno de los objetivos principales es desarrollar un modelo y validarlo frente a datos empíricos para conocer el rendimiento esperado de los métodos de regulación.

Para la modelación de la escala global se consideran los siguientes tipos de agentes: semáforos, estaciones, trenes y pasajeros. La forma de interacción entre los agentes se muestra en la Fig. 12; las acciones son la base para plantear una regulación general del sistema; por ejemplo, si el semáforo controla al tren entonces se tiene que definir como lo hace, si el tren se coordina con otros se tiene que crear el mecanismo de coordinación, si el pasajero interactúa con otros pasajeros lo hace ordenándose o posicionándose.

Las estrategias a plantear dependen de la información que se genera en el entorno. En los STP existen dos regímenes de comportamiento importantes, cuando hay y cuando no hay saturación de pasajeros, el principal factor de cambio de la dinámica es la densidad de pasajeros. Se plantea en este trabajo la regulación del sistema a través de estrategias que se adapten a estos cambios, específicamente, estrategias que cambien su funcionamiento interno a partir de la densidad de pasajeros existente en un momento particular.

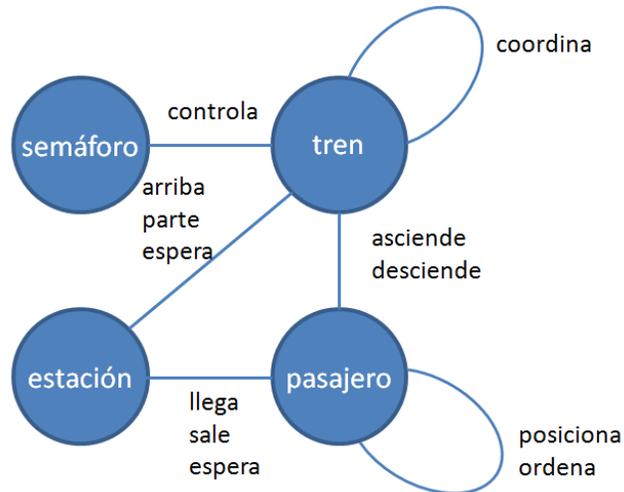


Figura 12: **Relación de los agentes y sus procesos.** Las aristas representan la relación que existe entre los agentes considerados en la simulación.

4.1.1. Obtención de datos empíricos

La manera más adecuada para obtener información y datos de la Línea 1 del MXM fue a través de videograbaciones, ya que se necesitó recolectar datos puntuales que no recaba el STC Metro. Las grabaciones se realizaron con dos cámaras *GoPro Hero Silver Edition* con memoria de 64 GB y capacidad de grabación en alta definición de 2 horas. Se propusieron dos métodos para recabar la información, el primero local, donde se fijó la cámara y se grabó en las plataformas de las estaciones, por ejemplo, Balderas y Pino Suárez; y el segundo global, donde se fijaron las cámaras en los extremos del vagón para grabar carreras completas (de terminal a terminal) (ver Fig. 13). Las grabaciones se realizaron en hora pico, por la mañana de 6:00 a 10:00 hrs y por la tarde de 19:00 a 22:00 hrs. En total se realizaron 54 grabaciones de recorridos completos y 6 en plataforma.



Figura 13: **Grabaciones realizadas en la Línea 1 del MXM.** (A) Grabación en el interior del vagón en horario de alta afluencia. (B) Grabación en la plataforma de la estación Pino Suárez, se muestra el ascenso y descenso de pasajeros.

4.1.2. Modelado de la Línea 1 del Metro de la Ciudad de México

Con el fin de probar el rendimiento de los métodos de regulación se usó el perfil de la Línea 1 del MXM, se consideró distancias, velocidades, número de trenes y demandas de pasajeros realistas. En la simulación computacional, desarrollada en el ambiente de programación NetLogo, el tiempo se mide en *ticks* donde cada tick equivale a $2/3$ de segundo. La unidad de espacio es llamado *patch*, donde cada patch representa 150 metros. El tiempo de actualización del modelo de Gipps y de los métodos de regulación coincide con el valor de los ticks, así como, la longitud del tren coincide con el tamaño de los patches. Los valores de los parámetros del modelo de Gipps; velocidad, aceleración y frenado, se establecieron a partir de una búsqueda sistemática en el espacio de parámetros, con los valores que mejor se ajustaron a las propiedades mecánicas de los trenes de la Línea 1 (ver sección anterior). Se construyó una línea cíclica con los siguientes elementos: una longitud de vía de 19.5 km; 20 estaciones con una longitud de 150 metros distribuidas a partir de sus segmentos interestación reales (de la estación Pantitlán a Observatorio), una carga de 16 trenes distribuidos de forma equidistante sobre la vía y un semáforo por estación para indicar el alto o salida del tren (Fig. 14). La línea se encuentra en un cilindro, esto significa que no hay fronteras y siempre existen el mismo número de trenes sobre la vía.

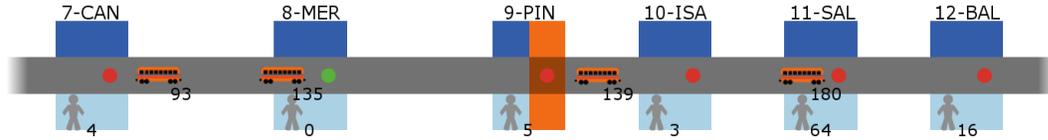


Figura 14: **Fragmento de la simulación computacional de la Línea 1 del MXM.** Las estaciones tienen un color azul con su identificador en la parte de arriba, los semáforos son los círculos en color rojo o verde, los trenes muestran la carga actual del vagón (en blanco), y la persona muestra la cantidad de pasajeros que están esperando en la estación (en negro). La posición del punto de medición del headway está en color naranja y coincide con la posición donde las mediciones empíricas fueron tomadas.

4.1.3. Dinámica de pasajeros

Cada viaje de pasajero fue modelado con una probabilidad de llegada $P_{llegada_k}$ y una de salida P_{salida_k} de la estación k . Estas probabilidades se definieron a partir de una muestra de las afluencias promedio por estación en el MXM. Los intervalos entre arribo de pasajeros siguen una distribución Poisson con media λ_p ticks. Valores bajos (p.e. $\lambda_p = 1$) y altos (p.e. $\lambda_p = 20$) de λ_p modelan un alto y bajo número de arribo de pasajeros en un periodo de tiempo respectivamente. Por ejemplo, si $\lambda_p = 5$, en promedio un nuevo pasajero llega a la estación k cada $5/P_{llegada_k}$ ticks en promedio. Los trenes constan de un vagón con una capacidad de 180 pasajeros con una sola puerta ya que los resultados en el proceso de ascenso y descenso son escalables a las 36 puertas del tren real (cuatro por cada vagón). Se definió el *tiempo efectivo de ascenso y descenso* que mide el tiempo exacto invertido que ocupan los pasajeros al subir y bajar del vagón considerando el encuentro entre el flujo principal que asciende y el flujo principal que desciende, el tiempo del proceso depende exclusivamente de la movilidad de los pasajeros y no del tiempo de puertas abiertas; por ejemplo, si la puerta del vagón permaneció abierta 1 minuto, y el intercambio de pasajeros se realizó en 30 segundos, los pasajeros que llegan a subir o bajar posteriormente ya no son contabilizados dentro del tiempo efectivo. De acuerdo a observaciones empíricas, se considera el tiempo de ascenso y descenso proporcional a 1 pasajero por segundo por puerta en promedio (ver Fig. 15).

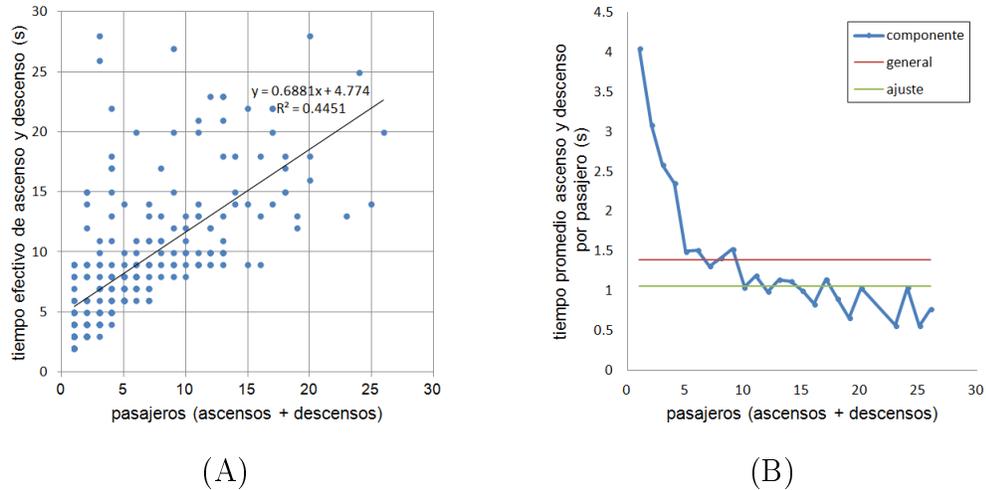


Figura 15: **Tiempo efectivo de ascenso y descenso.** (A) Se consideraron 14 carreras (terminal Pantitlán a terminal Observatorio y viceversa) que equivalen a 280 ascensos y descensos. En el eje horizontal se muestra la suma de pasajeros que suben y bajan, debido a que existe una desorganización en el proceso de ascenso no se pueden separar los tiempos. El tiempo de ascenso y descenso de 1 a 4 pasajeros se incrementa notablemente en horas pico por la necesidad de subirse al vagón sin importar la obstrucción que pueden provocar en las puertas; por ejemplo, una persona puede tardar hasta 9 segundos en subir debido a su comportamiento inadecuado. (B) Se muestran los promedios de cada componente elaborado con los datos de la figura (A); si descartamos este tipo de dinámicas en eventos donde están involucrados hasta 4 pasajeros el promedio general se ajusta a 1.06 pasajeros por segundo (línea en verde), mientras que, si se consideran los eventos de 4 pasajeros sube a 1.38 pasajeros por segundo en promedio (línea en rojo).

4.2. Desempeño de los métodos de regulación

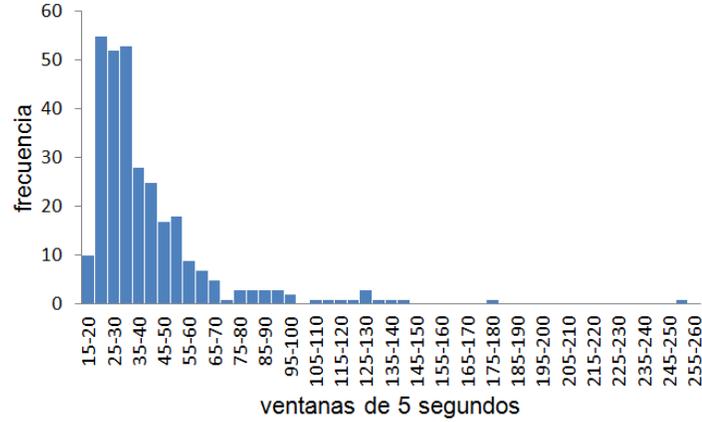
El Método General (GM) y el Auto-organizante II (SOM-II) regulan la dinámica de los trenes por medio de tiempos de espera; mientras que el primero lo hace con indicadores globales y estáticos el segundo usa información local para adaptarse a los cambios. Con el GM y valores adecuados de los parámetros se puede establecer una correlación alta respecto a los datos empíricos de los intervalos obtenidos en el MXM. Este resultado permite establecer una base para sustentar las posibles mejoras que se logran

obtener con el SOM-II. A través de la simulación computacional se probó el rendimiento de los métodos considerando los elementos previos como el modelado de la Línea 1 (en una sola dirección), la dinámica de pasajeros (llegadas y salidas) y el flujo de los trenes con el modelo extendido de Gipps y los parámetros adecuados; como condición inicial se consideran estaciones y trenes vacíos; los trenes se distribuyeron de forma equidistante y como medida de desempeño principal se obtienen las distribuciones de los intervalos para compararlas.

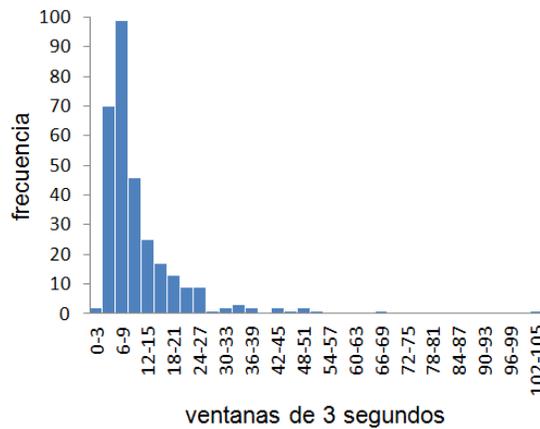
4.2.1. Correlación con el Metro de la Ciudad de México

El GM considera tres parámetros: el tiempo de espera mínimo del tren en la estación T_{min} , el máximo T_{max} y una distribución Poisson con media λ_r que representa el retraso causado por los pasajeros y por demora en la partida del tren. Se estableció un punto de medición sobre la vía (Fig. 14) para generar histogramas de frecuencias del intervalo y compararlos con los obtenidos empíricamente.

La distribución del intervalo de la Línea 1 del MXM se formó a partir de 299 datos obtenidos aproximadamente con 12 horas de videograbación en horarios de alta afluencia. Debido a la inestabilidad del fenómeno y con el fin de resaltar propiedades cualitativas más que cuantitativas se consideraron ventanas de tiempo de 20 segundos (Fig. 17). Se realizó una búsqueda sistemática sobre el espacio T_{min} , T_{max} y λ_r para encontrar los valores que ajusten lo mejor posible a la distribución del intervalo real. Los rangos de búsqueda se establecieron a partir de las mediciones empíricas considerando los tiempos mínimo y máximo de estacionamiento y el retraso en la partida (Fig. 16); éstos son los siguientes $16 \leq T_{min} \leq 40$, $20 \leq T_{max} \leq 200$ y $\lambda_r = \{3, 6\}$. Se corrió la simulación computacional hasta obtener las distribuciones del intervalo compuestas con 299 mediciones para cada posible vector $(T_{min}, T_{max}, \lambda_r)$. Posteriormente se calculó el coeficiente de correlación de Pearson a cada una de las distribuciones obtenidas. Los valores óptimos encontrados son $T_{min} = 24$, $T_{max} = 80$ y $\lambda_r = 3$, los cuales exhiben un coeficiente de correlación de Pearson de 0.98 (Fig. 17B). El intervalo puede ser excepcionalmente largo con más de 7 minutos debido a fallas mecánicas en el sistema real, sin embargo, en la simulación el intervalo máximo fue de 4 minutos.



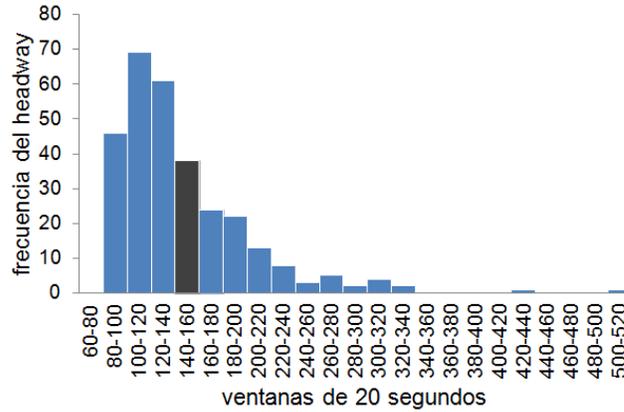
(A)



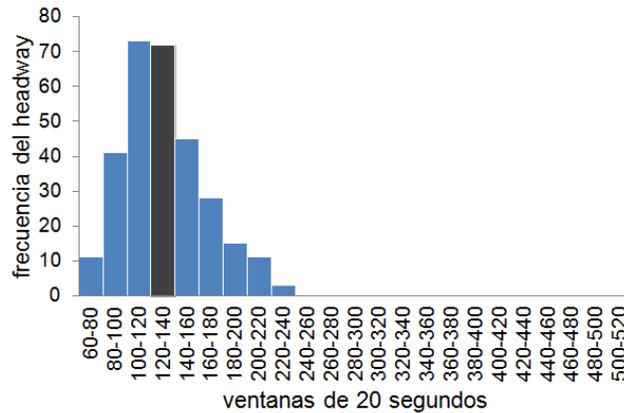
(B)

Figura 16: **Medidas tomadas en la estación Pino Suárez de la Línea 1.** (A) Histograma del tiempo de estacionamiento en ventanas de 5 segundos, el mínimo valor es 19 y el máximo 255. (B) Histograma del retraso en la partida del tren en ventanas de 3 segundos. Se contabiliza a partir del cierre de puertas ya que el tren está en condiciones de partir pero no lo hace por circunstancias externas; la mayoría de los retrasos se encuentran en las ventanas de 3 y de 6 segundos.

La simulación se corrió durante 100 veces con el mejor vector de parámetros encontrado ($T_{min} = 24$, $T_{max} = 200$, $\lambda_r = 3$) y semillas aleatorias diferentes



(A)



(B)

Figura 17: **Histogramas de la frecuencia del headway.** El valor del headway promedio en el sistema real es 147 segundos (A) y en el simulado con el método GM es 132 segundos, ilustrados con la barra en gris (B).

para observar la variación estadística entre la simulación del GM y el intervalo real. La condición inicial de la simulación es como se describió al principio de la sección. El histograma (Fig. 18) muestra que el máximo valor de la correlación es 0.98 y el promedio es 0.87 con una desviación estándar de 0.06 para los 100 experimentos. La variación estadística se produce por la probabilidad de llegada y salida de los pasajeros en las estaciones y el retraso en la partida de los trenes.

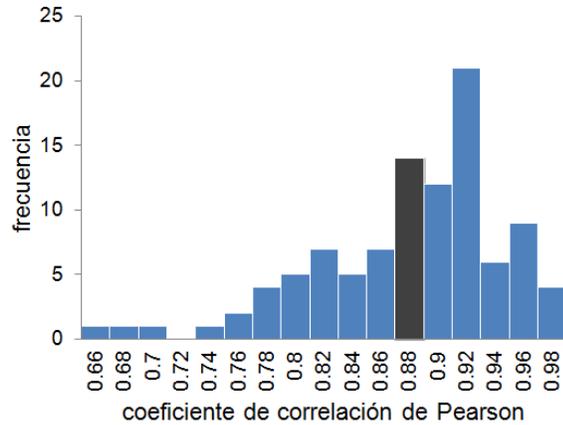
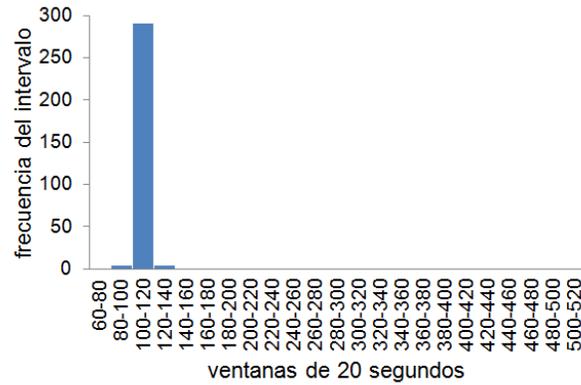


Figura 18: **Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación de Pearson entre la distribución del intervalo de la Línea 1 y 100 simulaciones del GM.** El máximo valor se encuentra en 0.98 y el promedio en 0.88 (barra en gris).

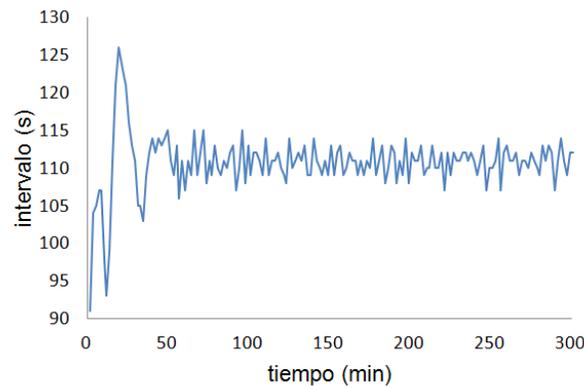
4.2.2. Comparación de métodos de regulación

El rendimiento del SOM-II mejora sustancialmente la estabilidad del intervalo (Fig. 19A) comparado con el GM (Fig. 17B). El histograma de frecuencias del intervalo muestra un promedio de 110 segundos, los cuales son 5 a 10 segundos menos de lo que estipula el headway teórico real de 115-120 segundos para la Línea 1 en condiciones de baja demanda, de acuerdo con el personal de operación del MXM (aunque no hay un documento oficial que sustente estas opiniones) por lo que se cumple la desigualdad de la ecuación Ec. 1. El SOM-II se adapta a los cambios locales generados por la afluencia de pasajeros (Fig. 19B). La serie de tiempo del intervalo muestra grandes fluctuaciones al inicio pero los trenes se adaptan a su configuración supra-óptima después de 40-50 minutos (Fig. 19B). Las pequeñas variaciones en las mediciones del intervalo se producen por el flujo de pasajeros.

El rendimiento del SOM-II y el GM se pueden comparar con los tiempos promedio de viaje de los pasajeros, con el flujo de salida de los pasajeros del sistema, con la velocidad de los pasajeros y los trenes. El parámetro de



(A)



(B)

Figura 19: **Comportamiento del intervalo con el SOM-II.** (A) Distribución del intervalo conservando la misma escala de tamaño de ventana para comparar adecuadamente con la distribución del intervalo del MXM y del método GM. (B) Comportamiento típico de las series de tiempo de los intervalos, en la estación Pino Suárez de la simulación.

control es el flujo de pasajeros λ_p como se definió al inicio de la sección con una variación en el intervalo $2 \leq \lambda_p \leq 10$. Para cada valor de λ_p la simulación se corrió durante 100,000 iteraciones; para descartar dinámicas transitorias, las primeras 30,000 iteraciones no se consideraron. Se usó el mismo conjunto de parámetros para los métodos y el modelo de Gipps para tener consistencia con los resultados anteriores. Los resultados de rendimiento se muestran en

la Fig. 20.

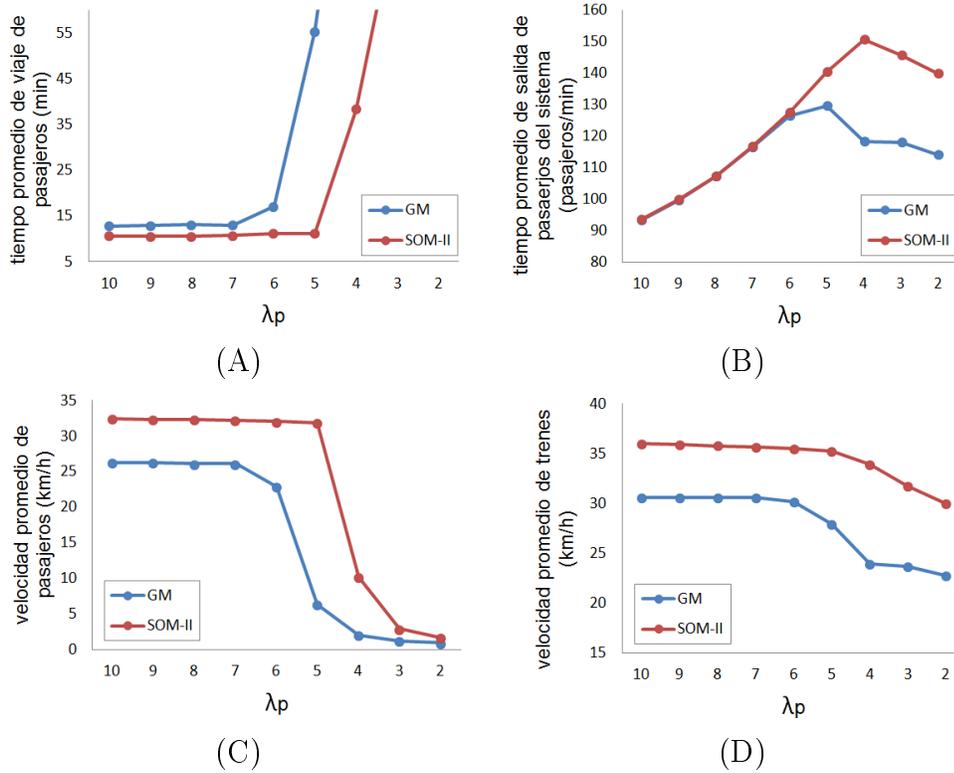


Figura 20: **Comparación de los métodos de regulación GM y SOM-II.** (A) Tiempo promedio de viaje de pasajeros. (B) Tiempo promedio de salida de pasajeros del sistema. (C) Velocidad promedio de pasajeros. (D) Velocidad promedio de trenes.

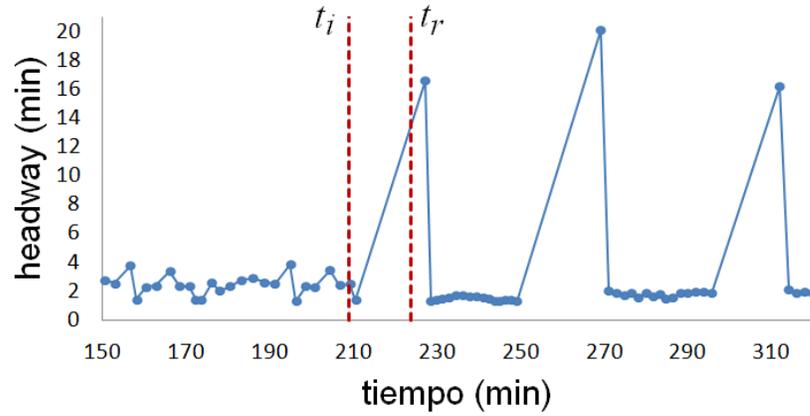
El rendimiento del GM se hace pobre cuando $\lambda_p \leq 6$ (Fig. 20A), ya que el tiempo promedio del viaje empieza a aumentar debido a la saturación de pasajeros en el sistema; por consiguiente, la velocidad promedio de los pasajeros (Fig. 20C) y la velocidad promedio de los trenes disminuye (Fig. 20D) cuando $\lambda_p = 6$; el SOM-II decrece su rendimiento de manera general para $\lambda \leq 4$ (Fig. 20A, 20C y 20D) lo que implica un incremento en la capacidad de transporte del 20% cuando $\lambda < 5$ y que se refleja en los pasajeros que concluyeron su viaje y salen del sistema (Fig. 20B).

Para probar la recuperación del intervalo con el GM y SOM-II se realizó el siguiente experimento: se inicializó el simulador como se mencionó anteriormente; en el minuto 209 se simuló una interrupción del servicio del $tren_0$ durante 15 minutos antes del punto de medición del headway; el intervalo de paro inicia y finaliza en t_i y t_r respectivamente (mostrado con líneas punteadas en la Fig. 21 y 22); por consiguiente los trenes traseros alcanzan al tren averiado y se forma un cúmulo de trenes de tamaño 10 con una distancia de seguridad de 300 metros entre ellos ¹. Después de esto, el tren reanuda la marcha. La serie de tiempo del GM no logra recuperar su dinámica anterior, se forman un convoy de trenes el cual tiene una separación de 16 a 20 minutos (Fig. 21A) y el sistema necesita de intervención externa para recuperarse; el tiempo invertido por el $tren_0$ para llegar al punto de medición del headway es de 16.95 minutos (descrito por el primer pico en la Fig. 21A), mientras que el valor mínimo del headway es de 1.28 minutos debido a la formación del cúmulo de trenes (Fig.22).

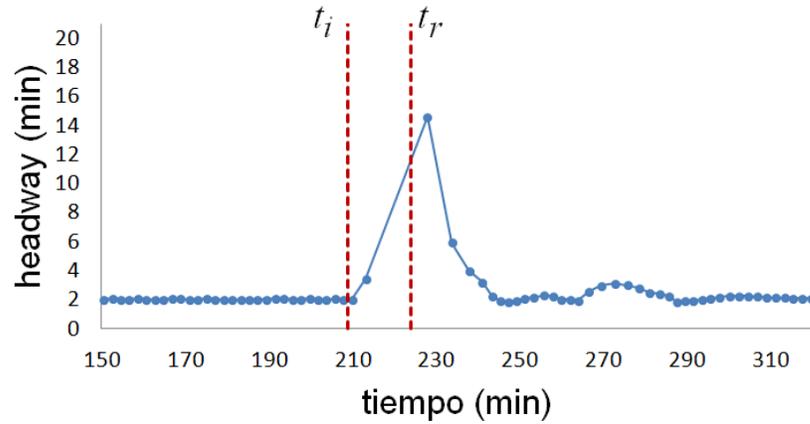
La acumulación de los pasajeros se incrementa en las estaciones debido a la interrupción del servicio. Los trenes acumulados pueden parar en las estaciones o entre ellas. En el primer caso, el tiempo de estacionamiento puede exceder el tiempo máximo T_{max} , lo que permite a los usuarios subir hasta alcanzar la capacidad máxima del tren o hasta que el servicio sea restaurado. En el segundo caso, los trenes permanecen parados en el segmento interestación.

Por otro lado, la serie de tiempo del SOM-II muestra una rápida recuperación del intervalo; al restaurarse el servicio se forma una brecha de 14.60 minutos, pero decrece rápidamente hasta recuperarse totalmente después de 50 minutos (Fig. 21A), el valor promedio del headway es de 2.4 minutos con una desviación estándar de 0.72 y valor mínimo de 1.84 minutos, los cuales son valores dentro del rango operacional del MXM.

¹En el MXM la distancia de seguridad entre trenes es aproximadamente de 300 metros.

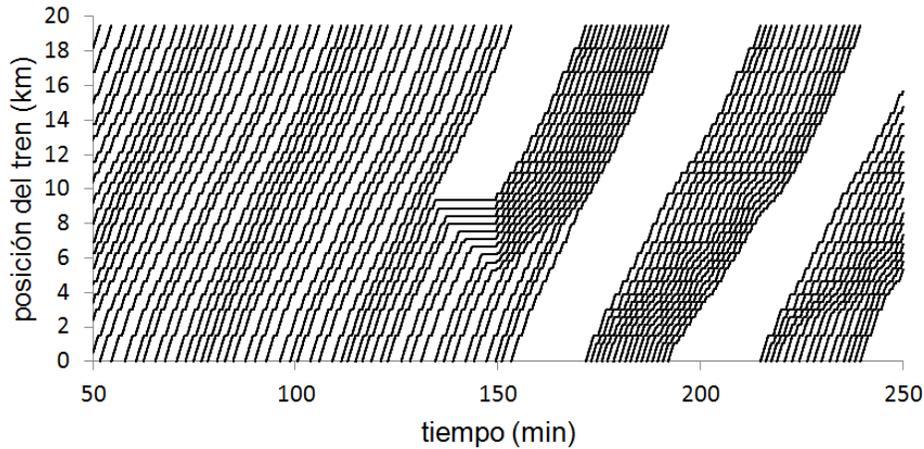


(A)

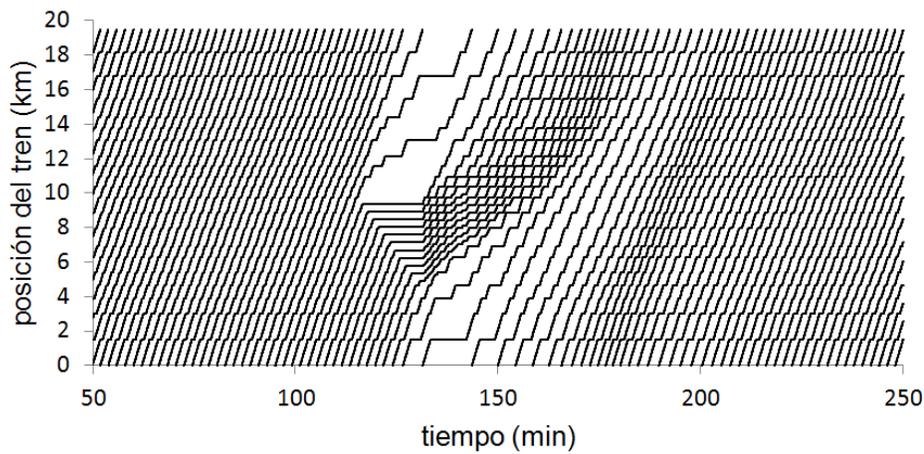


(B)

Figura 21: **Modelado de una falla mecánica.** La falla mecánica empieza y termina en el minuto $t_i = 209$ y $t_f = 224$ respectivamente. (A) Los valores del intervalo más altos en la serie de tiempo de GM representa la formación de cúmulos; el sistema no es capaz de restablecer el intervalo. (B) La serie de tiempo del SOM-II muestra que el método es robusto frente a perturbaciones y es capaz de restaurar el intervalo en poco tiempo.



(A)



(B)

Figura 22: **Diagramas espacio-tiempo de los trenes.** (A) Después de la falla mecánica con el GM, el sistema exhibe patrones en forma de rayas, características de la inestabilidad de intervalos iguales. (B) Antes y después de la falla mecánica, el SOM-II exhibe un patrón homogéneo y estable; los trenes enfrente del $tren_0$ esperan más en la estación antes de que la falla mecánica termine; debido a que se retrasa la partida del tren por el balance entre las variables $ETNextTrain$ y $antipheromoneStation$, se mejora y acelera la capacidad de recuperación del sistema.

4.2.3. Interfaz del simulador

El simulador, desarrollado en NetLogo, está organizado en dos partes; la primera tiene los botones, deslizadores y seleccionadores que controlan la dinámica del modelo; ésta contiene la estructura de la línea, los métodos de regulación, la variación de parámetros y los tiempos de ejecución. La segunda parte contiene el ambiente o mundo donde se ejecuta la simulación; incluye las gráficas para medir el desempeño y los monitores para verificar los valores actuales de las variables. En la Fig. 23 y 24 se presentan la capturas de pantalla de los controles y del ambiente y gráficas respectivamente.

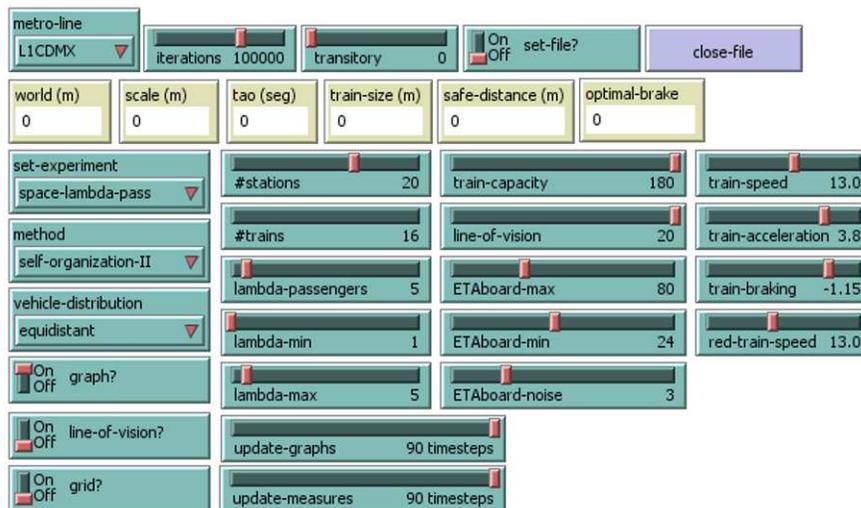


Figura 23: **Captura de pantalla de los controles del simulador.** Los controles definen el comportamiento de la simulación: el número de iteraciones (iterations), el número de iteraciones consideradas transitorias (transitory), el método de regulación (self-organizing-II o general-cdmx), la distribución de los trenes (equidistant, accumulated), el número de estaciones (#stations), el número de trenes (#trains), la magnitud del flujo de pasajeros (lambda-passengers), capacidad del tren (train-capacity), línea de visión (line-of-vision), tiempo de abordaje máximo (ETAbord-max), tiempo de abordaje mínimo (ETAbord-min), el retraso en la partida del tren (ETAbord-noise), la velocidad del tren (train-speed), la aceleración del tren (train-acceleration), el frenado del tren (train-braking) y el tiempo de actualización de las gráficas (update-graphs).

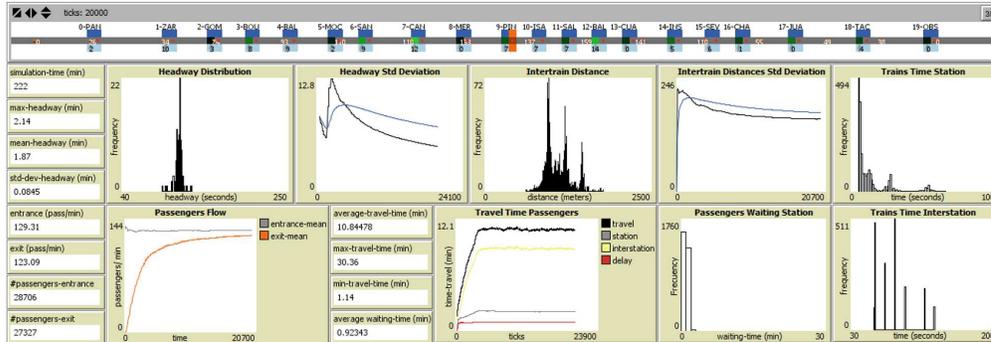


Figura 24: Captura de pantalla del ambiente y gráficas del simulador. Se muestra la ejecución de 20,000 iteraciones del SOM-II con las características de la línea 1. Las graficas permiten monitorear el desempeño de los métodos de regulación como la distribución del headway, la desviación estándar del headway, las distancias entre trenes, la desviación estándar de las distancias entre trenes, el histograma del tiempo de estacionamiento de los trenes, el flujo de pasajeros, el tiempo promedio de viaje de los pasajeros, el histograma del tiempo de espera de los pasajeros en las estaciones y el histograma del tiempo interestación de los trenes.

El lector puede consultar el código fuente en la dirección <http://turing.iimas.unam.mx/sos/?q=software> y ver videos del desempeño en el canal de youtube <https://www.youtube.com/channel/UC5gGvaoX0cRtLyUqLPk-0TA>. En el video <https://youtu.be/1AS9dWdr6kk> se presenta un experimento de la regulación del headway aplicando el SOM-II; se inicia con una configuración de trenes acumulados uno tras otro y finaliza con una distribución de trenes equitativa sobre el sistema. El desempeño típico se muestra en la Fig. 24, el histograma de frecuencias del headway está centrado alrededor de 1.87 minutos y tiene una desviación estándar pequeña (0.0845 minutos); los segmentos interestación también se concentran en una región con una desviación estándar muy baja y el tiempo promedio de viaje permanece estable, lo que implica que el sistema transporta eficientemente a los pasajeros aún cuando lleguen a las estaciones más de lo usual.

4.3. Discusión

En este capítulo se mostró el desempeño de los métodos de regulación GM y SOM-II en el escenario de la Línea 1 del MXM. El GM mostró una correlación alta respecto a los datos empíricos obtenidos en el MXM lo que implica que las comparaciones realizadas contra el SOM-II muestran los posibles escenarios si se implementara. El SOM-II elimina la inestabilidad del intervalo, es decir, reduce el fenómeno del *bus bunching* en un 100% ya que ajusta los tiempos de estacionamiento de manera adaptativa. Para $\lambda_p \geq 7$ el SOM-II mejora sobre el GM en un 18% el tiempo promedio de viaje de los pasajeros. Para $\lambda_p = 6$ la mejora es de 34%, para $\lambda_p = 5$ es de 79%; mientras que para $\lambda_p = 4$ es de 67%. La sobresaturación ocurre con GM cuando $\lambda_p \leq 6$ y con el SOM-II cuando $\lambda_p \leq 4$. El sistema colapsa cuando con GM cuando $\lambda_p \leq 5$ y con SOM-II cuando $\lambda_p \leq 3$.

Para probar la resiliencia del SOM-II se simuló una falla mecánica de un tren, se hizo alto total durante 15 minutos y se restableció posteriormente. Se observó una rápida recuperación del intervalo, con una inversión de 50 minutos. También si inicializó el sistema con una configuración de cúmulo de trenes, en el cual presentó una rápida adaptación para lograr intervalos regulares. El SOM-II mostró que es robusto frente a perturbaciones y exhibió una rápida recuperación en tiempo real, lo que implica una gran viabilidad para su implementación en el sistema real.

Existen estaciones de alta afluencia de usuarios en la Línea 1 del MXM, por ejemplo, las estaciones Pino Suárez y Balderas, lo que impacta negativamente en toda la línea. Para λ_p pequeñas, la saturación empieza por éstas estaciones y poco a poco se propaga a las demás; empieza a disminuir la capacidad de servicio hasta que colapsan la mayoría de las estaciones. Como trabajo futuro se podría combinar el SOM-II con esquemas de omisión de estaciones o *stop-skipping scheme* para reducir la sobresaturación en estaciones específicas.

El ascenso y descenso de pasajeros se modeló con una tasa de 1 pasajero por segundo con base en mediciones empíricas, sin embargo, con esquemas de regulación adecuados estas tasas podrían bajar impactando de manera positiva en los tiempos de estacionamiento. En el siguiente capítulo se exploran dos mecanismos de regulación de pasajeros para el ascenso y descenso.

Capítulo 5

Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros

Los sistemas de transporte públicos (STP), para su buen funcionamiento, necesitan la regulación del proceso de ascenso y descenso de pasajeros; sin una regulación adecuada, éste se convierte en una fuente de retrasos importante [35]. Se propone un método general de regulación que consta de dos partes; la primera es un método de regulación del tiempo de puertas abiertas a través de cotas adecuadas que surgen del patrón de viaje de los usuarios. La segunda parte regula el proceso de ascenso y descenso de pasajeros a través de dos propuestas, el método de “Señalamientos guía en plataforma”, el cual propone regular y fomentar la formación de flujos de pasajeros; y el segundo, el método de “Puertas dedicadas”, en el cual se asignan puertas exclusivas de entrada y salida del vagón. En su conjunto podría regular adecuadamente la dinámica de permanencia del tren en la estación y disminuir los retrasos.

Debido a la complejidad de los STP resulta costoso y en algunas ocasiones inaccesible implementar y probar estrategias de regulación, por tal motivo la investigación se apoya en simulaciones computacionales alimentadas con datos empíricos recolectados en el Metro de la Ciudad de México (MXM) para recrear ambientes con características semejantes a las reales. Se desarrolló un simulador computacional para modelar el proceso de ascenso y descenso de pasajeros usando el modelo de fuerzas sociales [30, 31] y las bibliotecas de PEDSIM (Microscopic Pedestrian Crowd Simulation Library) [12].

Las propuestas se fundamentan en los estudios y análisis realizados en la

Línea 1 del Metro respecto al tiempo efectivo de ascenso-descenso y la experimentación con el simulador computacional.

5.1. Caracterización del tiempo en estación

El tiempo de espera del tren en la estación está compuesto por varios eventos: 1. el tiempo de puertas abiertas, 2. el de cierre de puertas y 3. los tiempos de ascenso y descenso. Se ha tratado de caracterizar el tiempo en estación con tasas de ascenso y descenso para medir el desempeño del servicio [47], también se ha tratado de modelar los factores que afectan el tiempo del tren en la estación con el uso de conteo automático de pasajeros y con la localización automática de vehículos [48] o estimar el tiempo de permanencia con algoritmos genéticos [49]. Aunque existe una correlación entre el número de ascensos-descensos y el tiempo de espera del tren en la estación hay otros factores que contribuyen a la inestabilidad de este tiempo como el método de regulación de los trenes, el comportamiento de los pasajeros o el mal funcionamiento de la infraestructura. En la Fig. 25 se caracteriza el recorrido del tren de una estación *A* a *B* con base en las observaciones empíricas realizadas en el MXM, particularmente se enfoca en los eventos del tiempo de espera en la estación.

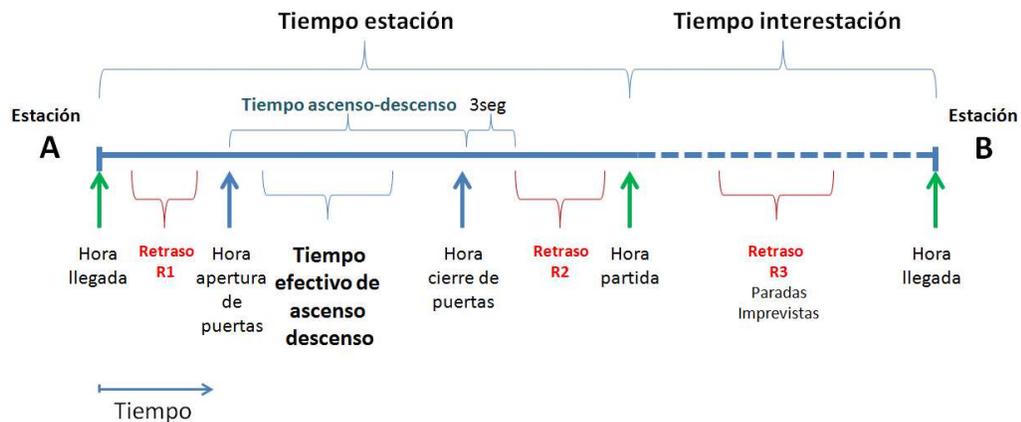


Figura 25: Caracterización del recorrido del tren de una estación *A* a *B*. En el MXM el tiempo en la estación contribuye de 25 a 40 % del tiempo total de viaje.

El ciclo de la Fig. 25 es el siguiente:

1. *Hora llegada.* El ciclo del diagrama inicia cuando el tren arriba a la estación *A*. Se registra la hora de llegada cuando el tren hace alto total, con este evento inicia el tiempo en estación.
2. *Retraso R1.* Lo normal es que el metro abra las puertas inmediatamente al hacer alto total, sin embargo en ocasiones, el metro tiene retrasos en la apertura de puertas de entre 1 a 4 segundos.
3. *Hora apertura de puertas.* Es el momento exacto en el que se abren las puertas del vagón.
4. *Tiempo efectivo de ascenso-descenso.* Es el tiempo que tardan los pasajeros en subir y bajar del vagón considerando los flujos principales de los pasajeros.
5. *Tiempo de ascenso-descenso.* Es el intervalo de tiempo acotado por la hora de apertura de puertas y la hora de cierre de puertas. En este intervalo los pasajeros pueden subir y bajar.
6. *Hora cierre de puertas.* Es el momento exacto en el que las puertas se cierran. El mecanismo de cierre de puertas invierte 2 segundos aproximadamente, aunque este tiempo se puede extender mucho más ya que depende de las obstrucciones que se presentan en ambientes saturados y el comportamiento inadecuado de los pasajeros.
7. *3seg.* A través de mediciones empíricas se observó que el tiempo adecuado y mínimo para que parta el tren después de la hora de cierre de puertas es de 3 segundos, es decir, las condiciones mecánicas del metro y la conducción del operador hacen posible que este tiempo se cumpla. Después de los 3 segundos ya puede ser considerado como retraso.
8. *Retraso R2.* Es el tiempo de retraso en la partida del tren (después del intervalo de 3 segundos), el metro permanece en la estación parado sin ninguna actividad con puertas cerradas y sin permitir el ascenso-descenso.
9. *Hora de partida.* Es el momento cuando el metro inicia su avance. Con este evento termina el tiempo en estación.

58 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros

10. *Tiempo en estación.* Es el intervalo que comprende desde la *Hora de llegada* hasta la *Hora de partida*.
11. *Tiempo interestación.* Es el intervalo de tiempo que inicia cuando el metro empieza a avanzar y salir de la estación *A* hasta llegar a la estación *B* y hacer alto total.
12. *Retraso R3.* Son los eventos cuando el metro se detiene en el segmento interestación. Se compone de la suma de los retrasos que puedan surgir en el recorrido.

5.2. Estado actual del proceso de ascenso y descenso en el Metro de la Ciudad de México

En el MXM existe una gran variación en los tiempos de permanencia del tren en la estación debido a factores operacionales y de logística, además, las altas saturaciones de pasajeros contribuyen al mal uso de la infraestructura; por ejemplo los pasajeros que bloquean la salida de los pasajeros de los vagones, los pasajeros que obstruyen las puertas durante el proceso de ascenso y descenso, o los que obstruyen el cierre de puertas por que el vagón esta totalmente saturado y no desean esperar el siguiente tren. Además, la variabilidad del número de ascensos y descensos por eventos es notable como lo muestra la serie de tiempo de la Fig. 26.

El retraso en el proceso de ascenso y descenso se hace más notable cuando hay alta saturación; por ejemplo, la Fig. 27 muestra el histograma del tiempo invertido en el cierre de puertas contabilizado desde el momento exacto en que la puerta se mueve para cerrar hasta el cierre definitivo. Mecánicamente este proceso invierte 2 segundos, pero debido a las obstrucciones por parte de los pasajeros ésta puede abrir y cerrar varias veces.

El tiempo de puertas abiertas de los vagones está ligado al estacionamiento del tren, no hay una regularidad que permita a los usuarios considerar una cota mínima o máxima en el proceso de ascenso-descenso. En la Fig. 28 se muestra un ejemplo de la serie de tiempo de puertas abiertas y su histograma de frecuencias.

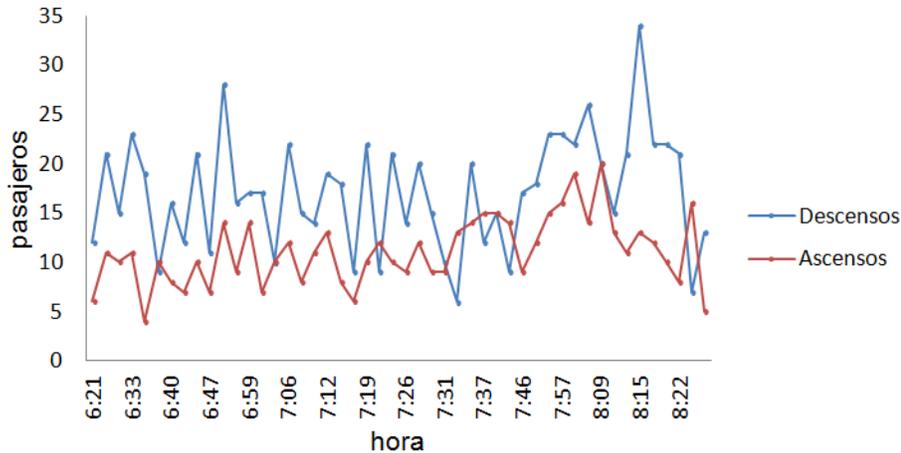


Figura 26: **Serie de tiempo de ascenso-descenso en estación Pino Suárez.** Registro en una puerta del vagón en la estación Pino Suárez de la Línea 1 en un horario de 6:20 a 8:20 am. El mayor número de descensos fue de 34 y el menor de 7; por su parte, el mayor número de ascensos fue de 20 y el menor de 4. En general la estación Pino Suárez por la mañana presenta un mayor número de descensos que de ascensos.

Estas tres características, la variabilidad de la afluencia, el tiempo de cierre de puertas y el tiempo de puertas abiertas impactan directamente en el rendimiento del sistema; las dos primeras se puede regular por medio de señalamientos adecuados, campañas de información y sistemas de monitoreo en tiempo real; el último, por medio de protocolos adecuados, por ejemplo, el establecimiento de tiempos mínimos y máximos de espera del tren en la estación y a su vez tiempos adecuados de puertas abiertas.

La estrategia de regulación actual para el ascenso y descenso es insuficiente y limitada, la leyenda en los vagones del metro “Antes de entrar permita salir” no se respeta y es aplicada poco por los usuarios. Lo usual es que cuando arriba el tren, los pasajeros esperan en la plataforma distribuidos casi homogéneamente, lo que implica que muchos queden parados enfrente de las puertas y provoquen choques y empujones en el descenso de pasajeros (Fig. 29).

60 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros

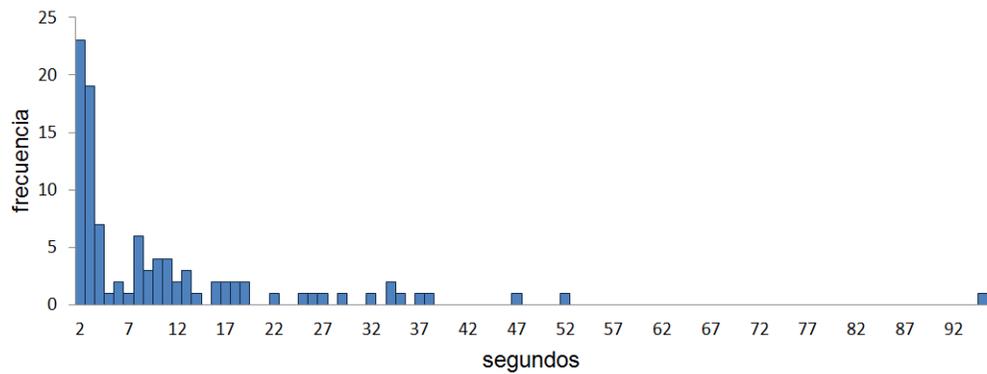
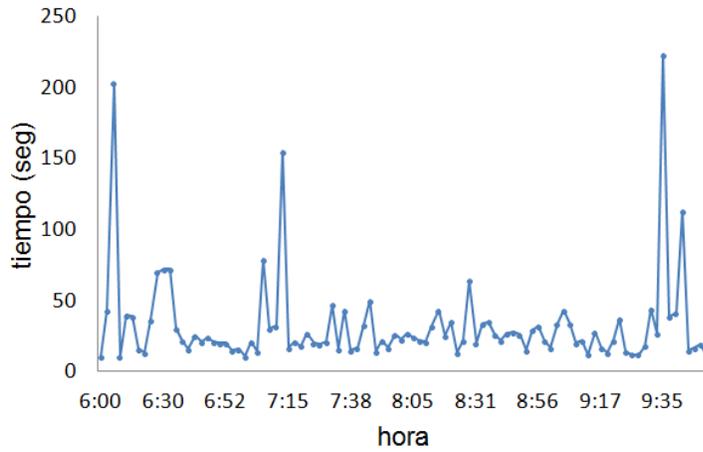
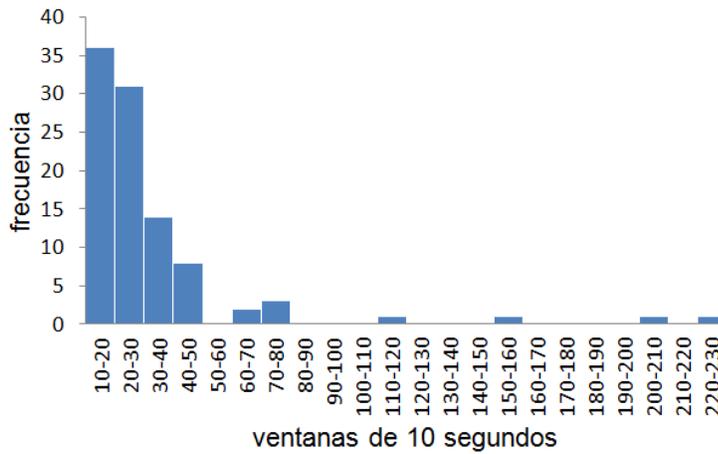


Figura 27: **Histograma del tiempo de cierre de puertas de los vagones.** Registro en la estación Balderas de la Línea 1 de 6:00 a 10:00 am. Los eventos más frecuentes son los que invierten de 2 a 4 segundos, que equivale al 50 %; el otro restante, se distribuye hasta los 95 segundos. Es recomendable regular este comportamiento con un mecanismo que fomente la espera en la plataforma cuando el vagón está totalmente lleno.



(A)



(B)

Figura 28: **Tiempo de puertas abiertas.** (A) Serie de tiempo registrada en la estación Balderas de 6:00 a 10:00 am, existen valores de más de 200 segundos (más de 3 minutos), (B) Histograma del tiempo de puertas abiertas. La mayoría de los eventos se encuentran en el rango de 10 a 30 segundos, sin embargo, existen eventos de más de 200 segundos lo que indica una gran inestabilidad en los tiempos.

62 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros



(A)



(B)



(C)

Figura 29: **Comportamiento de los usuarios en la Línea 1.** (A) Terminal Pantitlán a las 7:50 am. Los usuarios se reparten a lo largo de la plataforma; el ascenso ocurre rápido y sin obstrucciones debido a que el tren llega vacío, sin embargo, hay muchos empujones y fricciones. (B) Estación Balderas a las 8:36 am. El ascenso y descenso resultan muy complicados en momentos de saturación. (C) Estación Pino Suárez a las 7:30 am. Los pasajeros de la plataforma bloquean el descenso. La falta de regulación y de orden genera fricción y empujones entre los pasajeros.

5.3. Tiempo efectivo de ascenso y descenso

Para medir el tiempo de ascenso y descenso se propone el *tiempo efectivo de ascenso-descenso*, que indica el tiempo empleado en subir y bajar del vagón considerando el cúmulo principal de pasajeros tanto del interior del vagón como de la plataforma. Por estudios empíricos el 91 % de los pasajeros que desean subir o bajar se encuentran involucrados en este cúmulo principal [35]. La cota inferior de esta distribución (ver Fig. 30) se comporta casi de forma lineal, es decir, el tiempo invertido en subir o bajar es proporcional al número de pasajeros, la cota superior está dada por casos complicados o de alta saturación que en ocasiones coincide con el tiempo de cierre de puertas.

El histograma en dos dimensiones del tiempo efectivo de ascenso-descenso (Fig. 31) muestra las regiones con los eventos más probables; las regiones rojas, ámbar y amarillas suman el 35 % de los casos, mientras que, las zonas verdes y azules suman el 65 %, las cuales presentan una gran dispersión sobre el plano.

El MXM tiene un tiempo teórico de estacionamiento de 24 segundos, es una cota que se estableció bajo condiciones normales de operación aunque en la actualidad no se respeta; sin embargo, es viable respetar este tiempo ya que la mayoría de los eventos se encuentran por abajo, los pasajeros pueden subir y bajar sin problemas. Si se establece esta cota de manera fija en la operatividad del MXM tiene como beneficio eliminar los eventos causados por los pasajeros “necios” ya que provocan retrasos significativos.

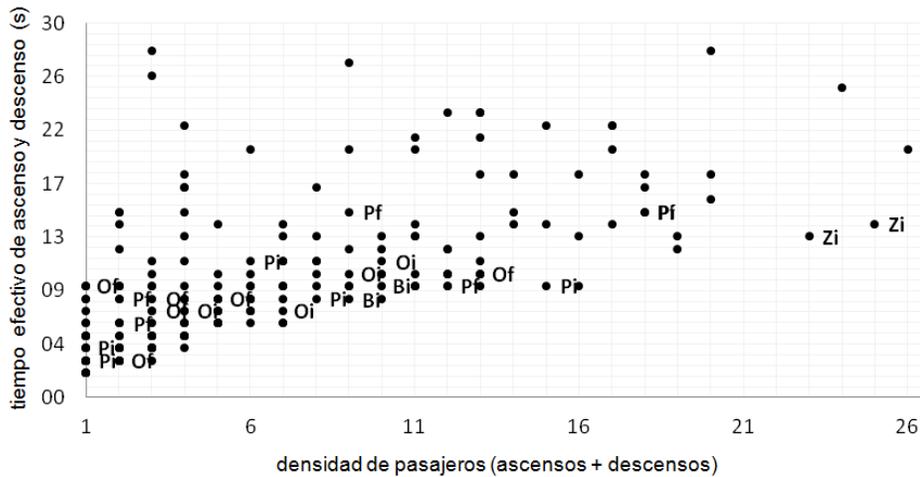


Figura 30: **Tiempo efectivo de ascenso-descenso.** La gráfica está compuesta con 235 eventos en diferentes condiciones de saturación. Las etiquetas de los puntos indican eventos que se desarrollan en las terminales; la etiqueta O_i indica la estación Observatorio en el inicio de la carrera, O_f indica la estación Observatorio al final de la carrera, P_i y P_f indican la terminal Pantitlán al inicio y al final respectivamente, Z_i y B_i indican la estación Zaragoza y Balderas respectivamente al inicio de la carrera, es decir se aplicó una estrategia de omisión de estaciones. Se puede observar lo siguiente: los eventos más rápidos son cuando el tren tiene ascensos y descensos tipo terminal; hay eventos con densidades bajas pero consumen demasiado tiempo, por ejemplo, 3 pasajeros invierten más de 25 segundos; y eventos con densidades altas a tasa de aproximadamente 1 pasajero por segundo (puntos en la parte superior derecha).

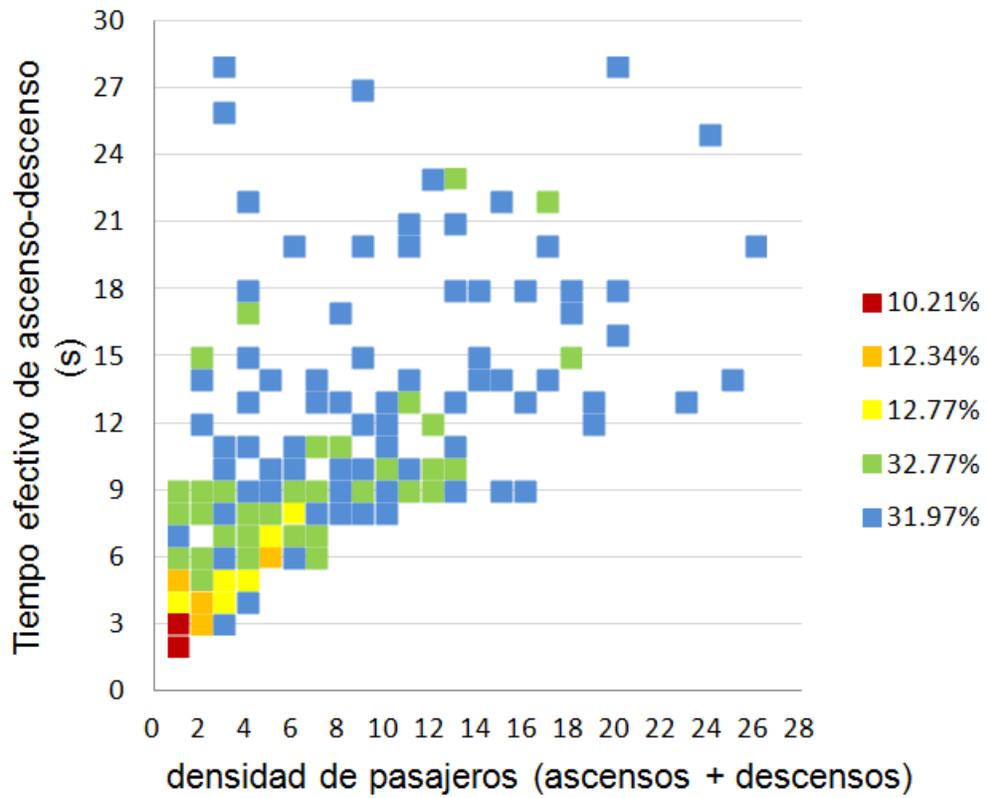


Figura 31: **Histograma 2D del tiempo efectivo de ascenso-descenso.** El histograma muestra la frecuencia de eventos de cada zona, las zonas rojas contabilizan alrededor de 13 a 11 eventos mientras que las zonas en azul 1 evento.

5.4. Regulación del tiempo de puertas abiertas

La información proporcionada por el tiempo efectivo de ascenso y descenso (TEAD) y el tiempo de puertas abiertas (TPA) permite considerar un intervalo de tiempo adecuado de operatividad para los usuarios. La diferencia $TPA - TEAD$ muestra el intervalo de reposo o ausencia de actividad (Fig. 32). Este intervalo se puede estimar para disminuir el tiempo de estacionamiento y mejorar el tiempo total de viaje de los pasajeros.

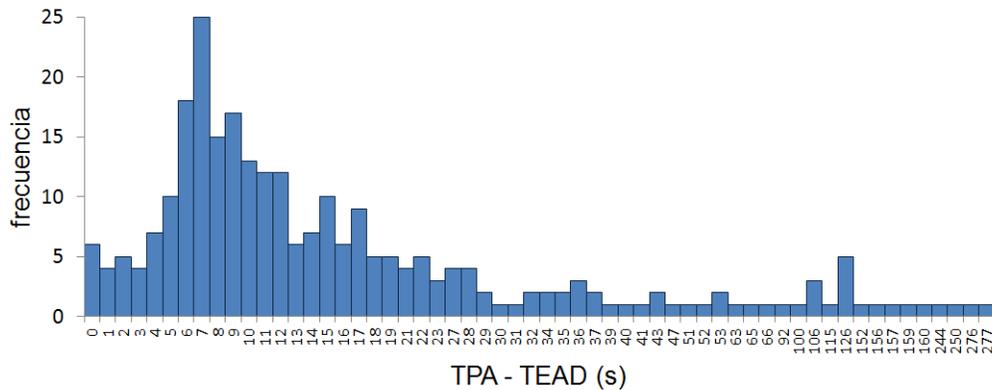


Figura 32: **Diferencia del TPA y el TEAD.** El histograma indica el tiempo de inactividad y su frecuencia; el más recurrente es de 7 segundos.

Si se acotara el proceso de ascenso-descenso en 24 segundos se dejarían afuera a los puntos más conflictivos considerando aumentar el tiempo en las terminales. La Fig. 33 muestra la distribución de frecuencias para el caso de truncamiento a los 24 segundos del TPA. Las barras en rojo indican los procesos de ascenso-descenso que se truncarían en un rango de -4 a -1 segundos, es decir, faltaron de 4 a 1 segundos para completar el proceso efectivo de ascenso y descenso, el cual, equivale al 8% de los casos que corresponde a los más conflictivos. El aumento de proporción de las frecuencias hacia los 24 segundos en la gráfica indica que la mayoría de los eventos tienen tiempo de sobra para ejecutarse. Los tiempos que se encuentran entre 0 y 8 segundos representan los eventos más apretados mientras que de 9 a 24 los más holgados. El máximo se encuentra en 24 segundos lo que indica eventos donde no hubo ascensos y descensos.

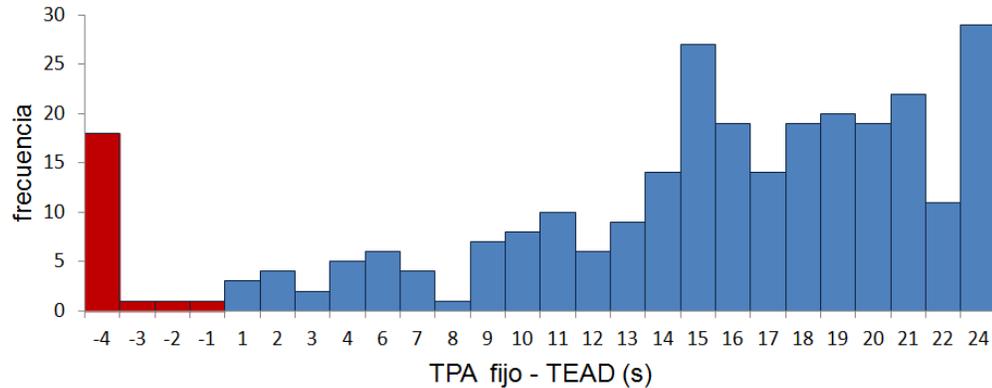


Figura 33: **Histograma de la diferencia del TPA establecido en 24 segundos y el TEAD.** El histograma fue realizado con datos empíricos de la Línea 1 del MXM con muestras en distintos horarios.

El tiempo de 24 segundos es adecuado de manera general, aunque un método más efectivo es el SOM-II presentado en la sección 2 ya que regula el tiempo de estacionamiento del tren a partir del flujo de pasajeros en la estación y el desempeño local de los trenes.

5.5. Estrategia “Señalamientos guía en plataforma”

La formación de flujos de pasajeros responde a la necesidad de subir y bajar rápidamente; supongamos que el vagón del tren está totalmente lleno y se acerca a una estación con una plataforma saturada; la movilidad en su interior es casi imposible, aún así, algunos pasajeros tratan de acomodarse cerca de la puerta; el primero que baja del vagón abre paso entre los pasajeros de la plataforma, el segundo lo sigue por atrás, y así sucesivamente hasta crear un flujo de descenso; si alguien desea bajar lo más conveniente es unirse a este flujo mientras exista, de otro modo será muy difícil. Con lo que respecta a los pasajeros en la plataforma, dejan muy poco espacio para los que bajan, una vez que se genera un espacio en el interior tienen la oportunidad de subir; se pueden crear flujos de ascenso pero estos dependen del acomodo previo. El intercambio de pasajeros puede resultar con mucha fricción debido a que

no hay una organización; los flujos surgen de manera espontánea y sin una organización previa (Fig. 34).



Figura 34: **Ejemplos de formación de flujos de pasajeros en la Línea 1.** (A) Estación Balderas en horario pico matutino. Los usuarios etiquetados del 1 al 5 se disponen a bajar en un ambiente sumamente saturado; se forma un flujo de descenso el cual contribuye para que los pasajeros que están al fondo puedan bajar. Se libera un poco de espacio para que los pasajeros que están en plataforma puedan subir. (B) Estación Tacubaya en horario nocturno. Previamente se crea un flujo de 5 pasajeros, los usuarios que están en la plataforma suben por los laterales formando dos flujos de ascenso. Se invita al lector a ver los videos en la siguiente dirección web <https://www.youtube.com/channel/UC5gGvoaX0cRtLyUqLPk-0TA/>.

Se han diseñado esquemas de ascenso y descenso en plataforma para regular a los pasajeros Fig. 35, algunas ciudades con sistemas de metro que cuentan con señalamientos son: Caracas, Río de Janeiro, Dubai, Hong Kong, Singapur, Tokio, Seoul, Beijing, Montreal, Munich y Boston.

Las videgrabaciones recabadas en el MXM han mostrado diversos casos en la formación de flujos de pasajeros en el proceso de ascenso y descenso, así como la desorganización que llega a existir. En ambientes saturados, seguir o integrarse a estos flujos puede convertirse en una buena estrategia para poder bajar y subir sin tanto estrés; por tal motivo es necesario fomentar y regular estos flujos a través de señalamientos adecuados.

Existen cuatro casos que dependen del arreglo previo de los pasajeros:

1. La formación de un flujo central para bajar y dos laterales para subir.

70 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros



Figura 35: **Ejemplos de señalamientos.** (A) Metro de Dubai. (B) Metro de Hong Kong.

2. La formación de un flujo izquierdo para bajar y un flujo derecho para subir.
3. La formación de un flujo derecho para bajar y un flujo izquierdo para subir.
4. La formación de un único flujo para bajar o para subir.

Los casos 1, 2 y 3 dependen de las posiciones previas de los pasajeros y del congestionamiento; estos casos surgen cuando se presenta cierto grado de organización, es decir, los usuarios esperan por algunos segundos el descenso de los pasajeros del vagón, y suben en fila uno atrás de otro. El caso 1 puede mostrar tres flujos simultáneos; los casos 2 y 3 muestran dos flujos y son equivalentes. El caso 4 se desarrolla en las terminales y en ocasiones cuando solo bajan o suben en estaciones normales. Existen casos desorganizados donde la dinámica no se encuentra en ninguno de estos casos, hay ascensos y descensos intercalados incluso con poca saturación.

La estrategia “Señalamientos guía en plataforma” tiene el objetivo de fomentar la dinámica del caso 1 para optimizar los tiempos de ascenso y descenso y elevar la calidad del viaje. Específicamente, los tiempos de ascenso y descenso deben ser separados para disminuir la fricción y formar dinámicas como en las terminales. No se puede asumir que los pasajeros van a respetar

los señalamientos al cien por ciento, pero al fomentar la organización de los flujos, el ascenso y descenso será más rápido y con menos fricción.

Cabe mencionar que el tiempo efectivo de ascenso y descenso está compuesto por la suma de tiempo de los dos procesos, ya que en la mayoría de los casos no hay una separación, en la práctica es sumamente difícil realizar los conteos por separado. En algunas ocasiones se desarrolla de manera intercalada dependiendo de la desorganización de los usuarios. También muestra que los mejores tiempos se obtienen en las terminales ya que solo suben o bajan.

La estrategia debe contar con una señalización adecuada en el piso de la plataforma para fomentar la formación de cúmulos de pasajeros en los laterales de las puertas y despejar la zona de salida de los vagones. Si se cumple con este objetivo los pasajeros formarían el flujo de salida el cual fomentará la espera de los pasajeros en la plataforma para después subir al vagón en dos flujos laterales. En la Fig. 36 se representa esquemáticamente la distribución de los elementos de la estrategia.

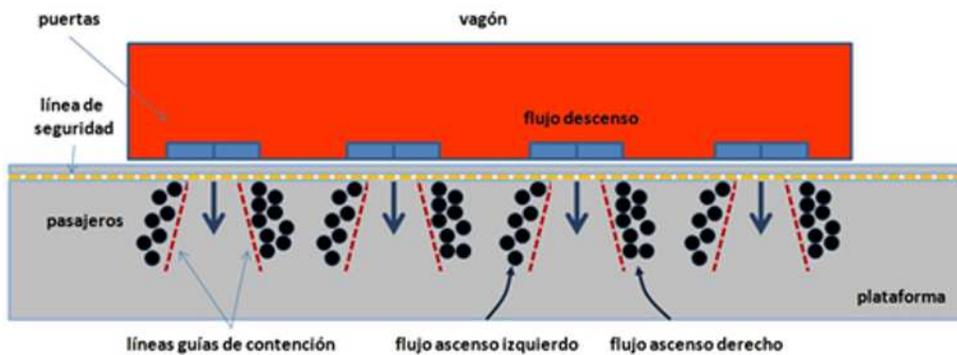


Figura 36: Esquema general de la estrategia de señalamientos guía.

72 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros

Para implementar esta estrategia se necesita lo siguiente:

1. Posicionar el tren correctamente en la plataforma. Debido a que los señalamientos son fijos, se necesita que el conductor estacione el tren en la longitud correcta a lo largo de la plataforma. En la situación actual la mayoría de las veces el tren se estaciona en la misma posición pero hay una desviación que se tiene que considerar.
2. Instalar las líneas guía de contención en la posición correcta de tal forma que las guías queden exactamente en las puertas.
3. Acotar el tiempo de puertas abiertas a través de alguna estrategia como la presentada en la sección anterior para optimizar el tiempo de viaje y evitar los casos de “pasajeros necios”.
4. Implementar una señal auditiva por un periodo de tiempo fijo para dar información al pasajero del termino de puertas abiertas.
5. Crear una campaña de concientización para informar a los usuarios del método de regulación aplicado.

Este método de regulación es considerado de bajo costo y de alto impacto ya que no se necesita modificar la operatividad de los trenes. Sin embargo, el proceso de concientización de los usuarios puede ser largo.

5.5.1. Modelo de Fuerzas Sociales

El flujo de pasajeros puede ser adecuadamente modelado con el *modelo de fuerzas sociales* [30, 32]. El modelo representa algunos de los patrones de movimiento que surgen en la dinámica real como la formación de filas al transitar en medios congestionados. El modelo sugiere que el movimiento de peatones puede ser descrito a través de tres componentes llamadas *fuerzas sociales*. La primera alude a que el peatón busca llegar a su destino lo más cómodo posible a través de puntos intermedios; la segunda a que el peatón está influenciado por otros peatones y por objetos (paredes, obstáculos, etc.) en el ambiente ejerciendo una fuerza repulsora sobre él; y la tercer fuerza a una dinámica de atracción ejercida por otros pasajeros (amigos, familia, artistas, etc.) y objetos (monitores, lugares de interés, etc.).

El modelo es continuo en el espacio y el tiempo; está gobernado por una ecuación diferencial ordinaria para el movimiento de cada peatón de la siguiente manera:

$$\frac{d\mathbf{r}_\alpha(t)}{dt} = \mathbf{v}_\alpha(t),$$

donde la posición del peatón α puede ser representado por los puntos $r_\alpha(t)$ en el espacio, los cuales cambian continuamente sobre el tiempo t y la ecuación de aceleración:

$$\frac{d\mathbf{v}_\alpha(t)}{dt} = \mathbf{f}_\alpha(t) + \xi_\alpha,$$

donde el cambio de las velocidades \mathbf{v}_α es interpretado como las fuerzas de movimiento que actúan sobre el peatón α llamadas *fuerzas sociales* $\mathbf{f}_\alpha(t)$; las fluctuaciones están gobernadas por el término ξ_α que representa variaciones aleatorias del comportamiento como accidentes o desviaciones deliberadas sobre la trayectoria óptima.

El comportamiento de $\mathbf{f}_\alpha(t)$ es la suma de las fuerzas mencionadas anteriormente, las cuales afectan simultáneamente el comportamiento del peatón α . Se toma en cuenta la fuerza de aceleración $\mathbf{f}_\alpha^0(\mathbf{v}_\alpha)$, efectos repulsivos $\mathbf{f}_{\alpha B}(\mathbf{r}_\alpha)$ debido a los bordes que se encuentran en el ambiente como paredes, atracciones repulsivas $\mathbf{f}_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_\alpha, \mathbf{v}_\alpha, \mathbf{r}_\beta, \mathbf{v}_\beta)$ con otros peatones β , y efectos de atracción $\mathbf{f}_{\alpha i}(\mathbf{r}_\alpha, \mathbf{r}_i, t)$; con lo que se obtiene la ecuación:

74 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros

$$\mathbf{f}_\alpha(t) = \mathbf{f}_\alpha^0(\mathbf{v}_\alpha) + \mathbf{f}_{\alpha B}(\mathbf{r}_\alpha) + \sum_{\beta \neq \alpha} \mathbf{f}_\alpha(\mathbf{r}_\alpha, \mathbf{v}_\alpha, \mathbf{r}_\beta, \mathbf{v}_\beta) + \sum_i \mathbf{f}_{\alpha i}(\mathbf{r}_\alpha, \mathbf{r}_i, t) + \xi_\alpha.$$

Los términos se explican a continuación:

1. Cada peatón camina con su velocidad deseada v_α^0 en la dirección de su siguiente destino \mathbf{e}_α . Las desviaciones de su rapidez actual \mathbf{v}_α de la rapidez deseada $\mathbf{v}_\alpha^0 = v_\alpha^0 \mathbf{e}_\alpha$ son corregidas por el término de relajación τ_α definido como:

$$\mathbf{f}_\alpha^0(\mathbf{v}_\alpha) = \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0 \mathbf{e}_\alpha - \mathbf{v}_\alpha)$$

donde la dirección deseada $\mathbf{e}_\alpha(t)$ se define como:

$$\mathbf{e}_\alpha(t) = \frac{\mathbf{r}_\alpha^k - \mathbf{r}_\alpha(t)}{\|\mathbf{r}_\alpha^k - \mathbf{r}_\alpha(t)\|}$$

y $\mathbf{r}_\alpha(t)$ denota la posición actual del peatón α al tiempo t a través de la trayectoria del polígono con aristas $\{\mathbf{r}_\alpha^1, \mathbf{r}_\alpha^2, \dots, \mathbf{r}_\alpha^k, \dots, \mathbf{r}_\alpha^n\}$ que obedece a la trayectoria óptima que recorre el peatón hasta llegar a su destino \mathbf{r}_α^n .

2. Los peatones se alejan o guardan distancia de los bordes de las paredes para evitar el riesgo de colisión; entre más cercano está del borde más fuerza ejerce para retirarse. El término $\mathbf{f}_{\alpha B}$ modela la fuerza repulsora la cual decrece de forma monótona con la distancia $\|\mathbf{r}_\alpha - \mathbf{r}_B^\alpha\|$ entre la posición $\mathbf{r}_\alpha(t)$ del peatón α y el punto más cercano \mathbf{r}_B^α del borde. Esto puede ser expresado en término del potencial de repulsión V_B de la siguiente manera:

$$\mathbf{f}_{\alpha B}(\mathbf{r}_\alpha) = -\nabla_{\mathbf{r}_\alpha} V_B(\|\mathbf{r}_\alpha - \mathbf{r}_B^\alpha\|)$$

El término de repulsión $\mathbf{f}_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_\alpha, \mathbf{v}_\alpha, \mathbf{r}_\beta, \mathbf{v}_\beta)$ indica que el peatón α guarda una distancia que depende de otros peatones β . Esta ecuación modela una área de privacidad alrededor del peatón α la cual ayuda a evitar colisiones en caso de cambios repentinos de velocidades.

3. Los peatones también muestran un comportamiento de unión, por ejemplo, cuando viajan con familia, amigos o en grupos con algún fin particular. También los objetos del ambiente pueden llamar su atención y ser atraídos, como señalamientos, monitores de información o eventos inusuales localizados en la posición \mathbf{r}_i . Estas situaciones pueden modelarse con la fuerza de atracción $\mathbf{f}_{\alpha i}(\mathbf{r}_\alpha, \mathbf{r}_i, t)$ similar a los efectos repulsivos mencionados anteriormente con la diferencia de que la atracción disminuye con el tiempo t debido a que el interés decae.

Esta descripción no pretende ser exhaustiva; para una descripción detallada de los términos del modelo de fuerzas sociales se puede consultar [31, 55–57].

5.5.2. Simulación computacional

Se desarrolló una simulación computacional con la biblioteca PEDSIM¹ (Microscopic pedestrian crowd simulation library) [12], la cual utiliza el modelo de fuerzas sociales, para construir la estrategia *Señalamientos guía en plataforma* con el objetivo de medir el desempeño en el ascenso y descenso de pasajeros y compararla con escenarios del MXM.

La simulación se desarrolla en un vagón representativo con sus cuatro puertas de acceso. En el interior del vagón se encuentran acumulados 24 pasajeros por puerta dispuestos para salir y en el exterior se encuentran 12 pasajeros en cada lado de la puerta dispuestos para bajar, de esta manera tenemos un caso extremo donde el mismo número de pasajeros desea subir y bajar. Los cúmulos de los pasajeros presentan una cierta desorganización en la inicialización pero una vez que se disponen a subir o bajar los cúmulos de pasajeros se ordenan en flujos, una propiedad del modelo de fuerzas sociales. El experimento considera un caso base que es difícil observar en la realidad, pero permite estudiar estos casos para establecer cotas inferiores de tiempo; cualquier obstrucción aumentará el tiempo de ascenso-descenso.

En la Fig. 37 se presentan los elementos de la simulación, los pasajeros que se encuentran del lado izquierdo de la puerta son identificados con rojo y los que se encuentran del lado derecho con azul. Los pasajeros en el interior del vagón se identifican con blanco. Se definió previamente la dirección que toman los pasajeros al salir, los que salen por la puerta 1 y 2 se dirigen a la izquierda y los que salen por las puertas 3 y 4 a la derecha.

¹<http://pedsim.silmaril.org/>.

76 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros

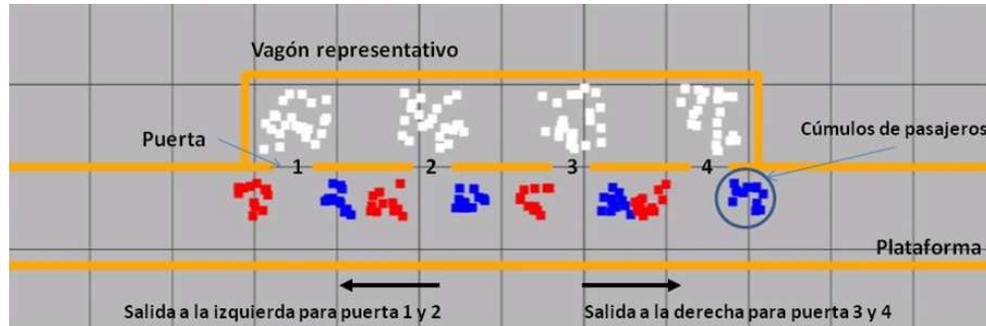


Figura 37: **Elementos de la simulación.**

El modelo tiene cuatro parámetros principales los cuales fueron calibrados a partir de los datos empíricos que se obtuvieron con las grabaciones y los análisis hechos en la investigación. Los valores de los parámetros² utilizados son los siguientes:

1. Factor Social Force: 17
2. Factor Obstacle Force: 4.5
3. Factor Desired Force: 4.0
4. Velocity: 0.35

Cada iteración del modelo equivale a 0.046 segundos, se establece como velocidad base 2.4 metros por 3 segundos, el cual es el tiempo que tarda una persona en recorrer el ancho del vagón, es decir, de puerta a puerta. A continuación se muestra la secuencia de una corrida de la simulación (Fig. 38 a 44).

²El simulador cuenta con el archivo config.xml el cual contiene la definición de los parámetros.

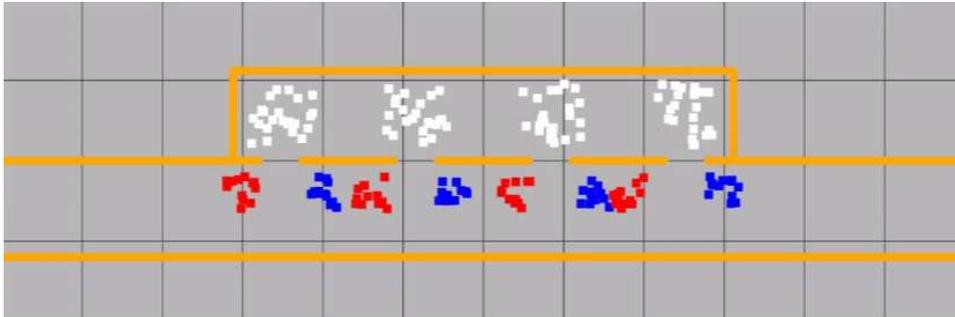


Figura 38: . Condición inicial de la simulación.

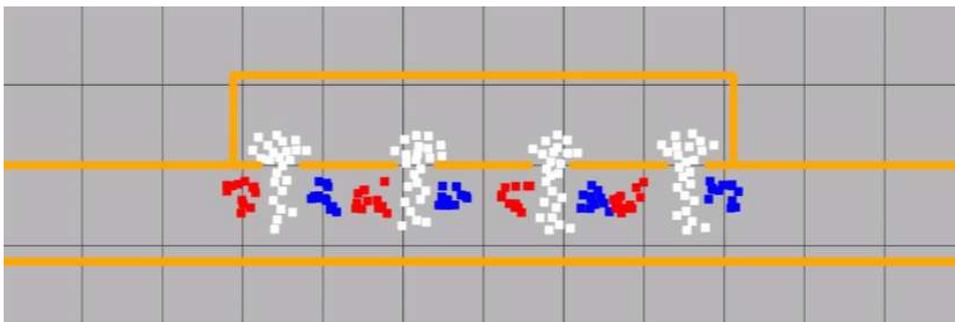


Figura 39: **Simulación.** Los pasajeros en azul y rojo ubicados en la plataforma esperan a que salgan los pasajeros del interior del vagón. La posición de los pasajeros es una parte importante de la estrategia, se despejan las salidas para que no haya obstrucciones.

El tiempo de espera de los pasajeros para iniciar el proceso de ascenso es un parámetro importante dentro de la dinámica, si no se espera lo suficiente chocarán con los que están bajando y habrá mucha fricción, por consiguiente, se incrementará el tiempo efectivo de ascenso y descenso. Para observar como impacta este comportamiento en el tiempo efectivo de ascenso y descenso se ejecutaron un conjunto de simulaciones variando el tiempo de espera en un rango de 0 a 9 segundos. Los experimentos (ver Fig. 45) se realizaron estableciendo 8 cúmulos de 10 pasajeros en la plataforma posicionados en los extremos de las puertas y 4 cúmulos de 20 pasajeros en el interior del vagón distribuidos en cada región de la puerta, de esta manera tenemos un intercambio equilibrado con 80 pasajeros que desean subir y 80 que desean bajar. El eje de las ordenadas muestra el tiempo de espera de los

78 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros

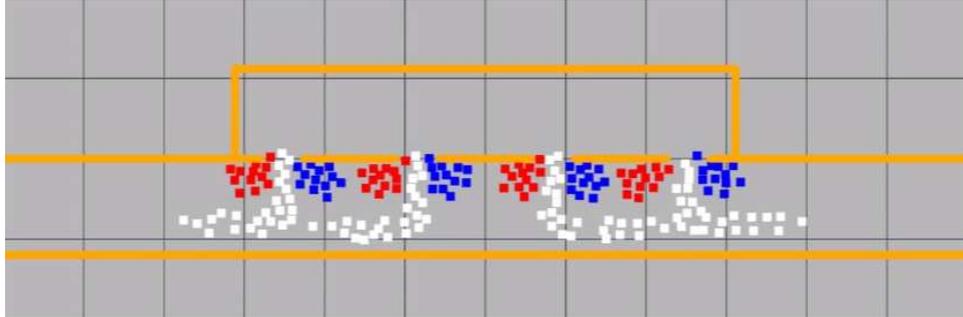


Figura 40: **Simulación.** Los pasajeros en azul y rojo se disponen a subir, se acaba el tiempo de espera debido a que los pasajeros en blanco ya están por salir completamente, aunque los pasajeros de la plataforma inicien el ascenso pueden existir tres flujos simultáneos en la puerta, dos de entrada y uno de salida.

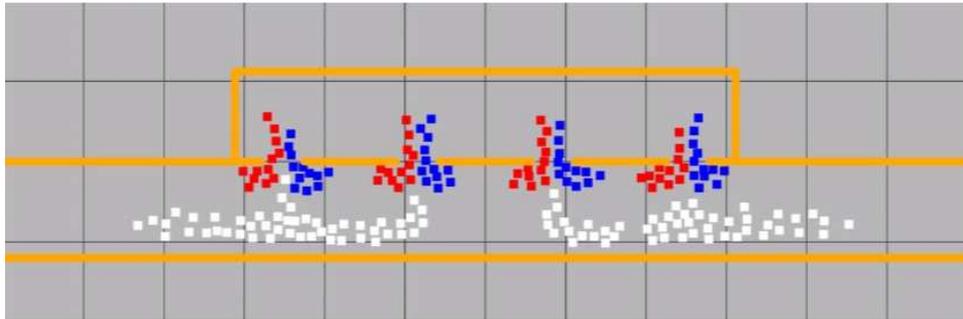


Figura 41: **Simulación.** Se forman dos flujos en el ascenso, los mismos que se han detectado en mediciones empíricas. Esta configuración es óptima ya que se utiliza todo el espacio de la puerta y la organización hace que disminuya la fricción. Los pasajeros en blanco ya han salido y se disponen a tomar sus salidas (definidas previamente).

pasajeros de la plataforma, y el eje de las abscisas el tiempo efectivo de ascenso-descenso. El tiempo de medición se trunca una vez que el 98 % de los pasajeros han subido o bajado. Se observa que la dinámica se divide en dos fases, una fase sin fricción que comprende del intervalo $[4.6, 8.3]$ y una fase con fricción en el intervalo $[0, 4.6]$. Si los pasajeros de la plataforma esperan menos de 4.6 segundos chocarán con los pasajeros que bajan, por ejemplo si esperan 1 segundo chocarán inmediatamente con los pasajeros que bajan,

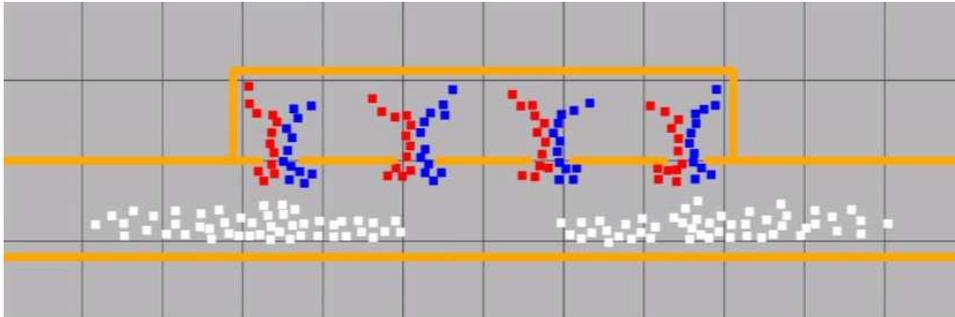


Figura 42: **Simulación.** Debido a la estrategia de abordaje de cada usuario, los pasajeros se cargan a su lado preferente, es decir, los pasajeros que entran por la izquierda se van a la izquierda y los que se cargan a la derecha se quedan en la región derecha. Esta dinámica se observa empíricamente, las personas mantienen su dirección de entrada.



Figura 43: **Simulación.** Los usuarios se reparten en el interior del vagón.

como consecuencia se incrementará el tiempo efectivo de ascenso-descenso. Los tiempos pueden ser muy variables en la zona de fricción todo depende de la distribución de los usuarios. Son suficientes de 3 a 5 segundos para formar el flujo de salida, de esta manera es más difícil destruirlo o fragmentarlo, obligando a los usuarios de la plataforma a subir por los laterales de las puertas. Si no hay tiempo de espera suficiente, el tiempo de ascenso y descenso se incrementa notablemente, por ejemplo, alrededor del segundo 1.5 se encuentra el máximo valor de la gráfica.

Para analizar si la estrategia propuesta puede mejorar el tiempo efectivo de ascenso y descenso se realiza una gráfica comparativa del desempeño (Ver Fig. 46) entre la configuración actual (sin regulación), donde hay un

80 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros

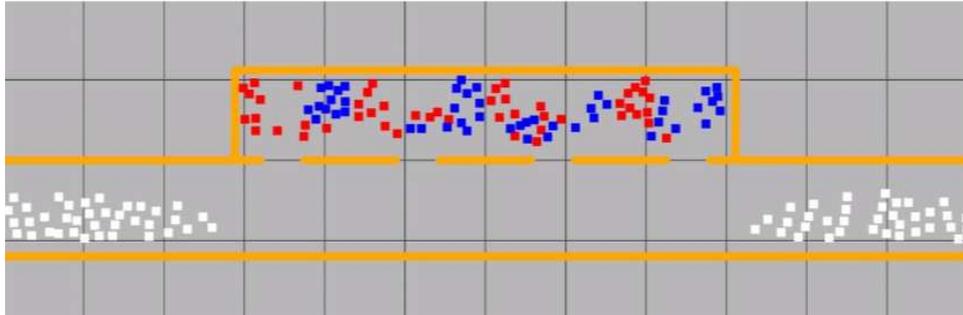


Figura 44: **Simulación.** En esta etapa el proceso de ascenso y descenso ha terminado. La simulación no considera estrategias de acomodamiento.

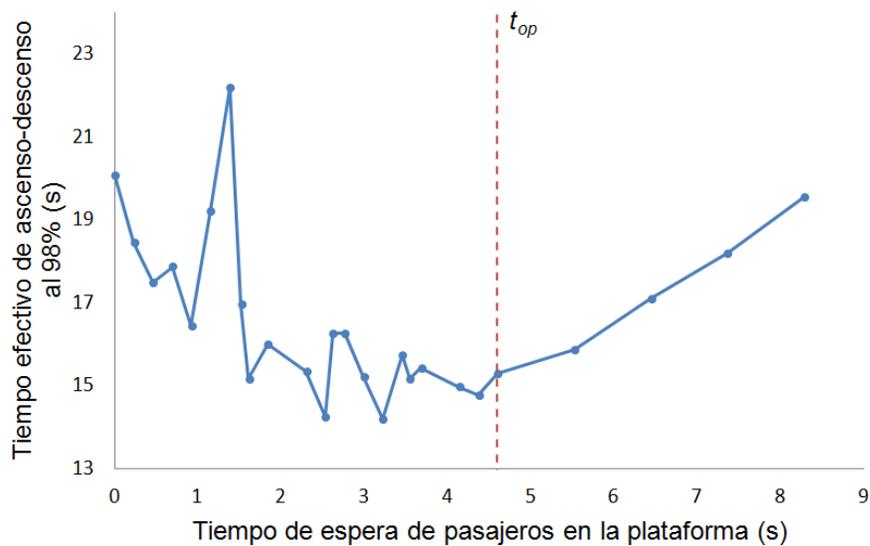


Figura 45: **Tiempo de espera de los pasajeros en la plataforma en el proceso de ascenso.** La línea roja indica el tiempo mínimo óptimo t_{op} de espera para el caso de 80 pasajeros que suben y 80 que bajan.

tiempo mínimo de espera de los usuarios en la plataforma y la estrategia *señalamientos guía* donde se consideran tres tiempos de espera, óptimo, fijo y mínimo. Cada curva muestra el desempeño del tiempo efectivo de ascenso y descenso. La configuración actual (en azul) es la que invierte mayor tiempo; líneas guía sin respetar el tiempo de espera (en verde) es muy semejante a

la configuración actual, aún siendo repartidos en los extremos de las puertas para permitir el descenso; líneas guía con tiempo de espera fijo (color rojo) retiene a los pasajeros durante 4 o 5 segundos, ayuda a que mejoren los tiempos pero aún hay un lapso de inactividad; y para finalizar, líneas guía con tiempo de espera óptimo, los pasajeros de la plataforma permiten el descenso completo de los pasajeros para inmediatamente despues iniciar el ascenso, esto reduce los tiempos en un 30 % además de fomentar la organización de flujos de pasajeros en el proceso, se evita la fricción y aumenta la calidad del viaje.

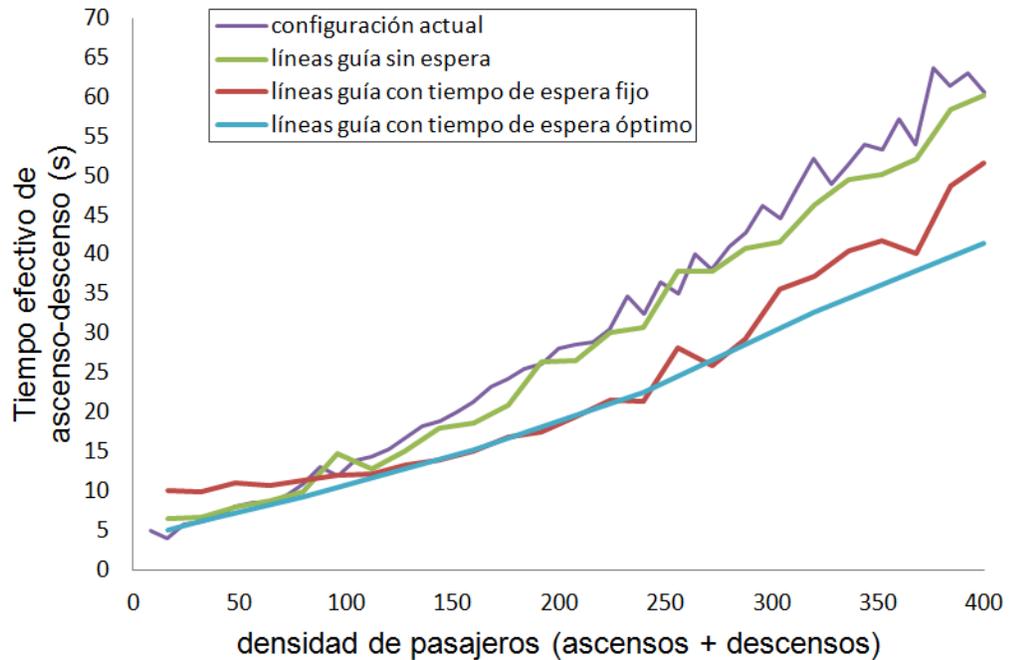


Figura 46: **Comparación entre señalamientos guía y configuración actual.** La densidad de pasajeros se varía para calcular el tiempo efectivo de ascenso-descenso. El evento extremo ocurre con un vagón totalmente lleno, 200 pasajeros desean bajar y 200 pasajeros desean subir. La línea roja indica un tiempo de espera de 4 segundos, para ciertas densidades se hace óptimo, por ejemplo de 100 a 200 pasajeros; para densidades mayores, el tiempo efectivo de ascenso y descenso empieza a fluctuar. Los mejores tiempos se obtienen cuando los pasajeros en la plataforma esperan a que salgan del vagón para inmediatamente subir.

5.6. Estrategia “Puertas Dedicadas”

La segunda propuesta de regulación usa puertas exclusivas de entrada y de salida para los pasajeros con la finalidad de crear mayor movilidad dentro del vagón³. En la Fig. 47 se muestra una configuración, las dos puertas de los extremos son asignadas como entradas y las dos puertas del centro como salidas.

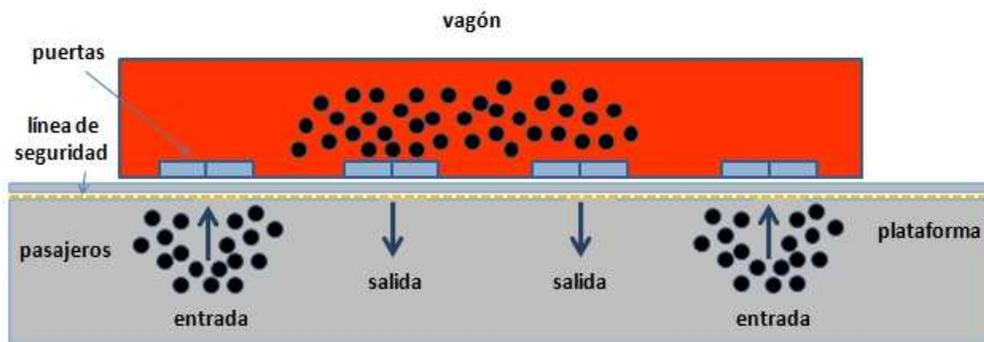


Figura 47: Estrategia *Puertas dedicadas*.

Las puertas exclusivas tienen la finalidad de realizar ascensos y descensos tipo terminal y minimizar la fricción ya que no hay intercambio de pasajeros en la misma puerta. A diferencia de la estrategia “Señalamientos guía en plataforma” se le da una mayor responsabilidad al usuario ya que tendría que planear su descenso y ubicarse cerca de la salida como lo hacen en otros transportes públicos como Trolebús y Red de Transporte Público, entran por enfrente y salen por atrás.

La dinámica del interior del vagón es sumamente estática, las mediciones realizadas en el MXM muestran que en promedio 4.2 pasajeros se cambian de una zona a otra, es decir, solo 4 pasajeros están dispuestos a moverse para encontrar una posición más cómoda. Para implementar esta estrategia el 100 % de los usuarios tendrían que moverse a las zonas intermedias del vagón para salir e interactuar con los demás para llegar a la configuración deseada.

³Esta propuesta fue ganadora en la categoría de Desarrollo de Proyectos en el *Primer Premio a la Innovación Tecnológica “Ing. Juan Manuel Ramírez Caraza”* del Metro de la Ciudad de México en diciembre del 2014.

84 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros

Con el simulador se implementó un caso base del método de regulación. En la Fig. 48 se observa la condición inicial de pasajeros, hay 136 pasajeros en la plataforma y 136 pasajeros en el interior del vagón, los cuales desean subir y bajar simultáneamente.

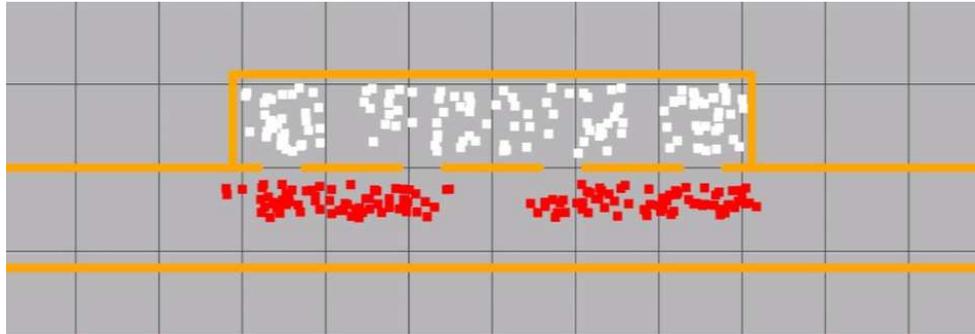


Figura 48: **Inicio de la simulación.** Los pasajeros rojos están distribuidos casi homogéneamente sobre la plataforma, dejan un espacio libre en el centro del vagón para que los pasajeros blancos puedan descender.

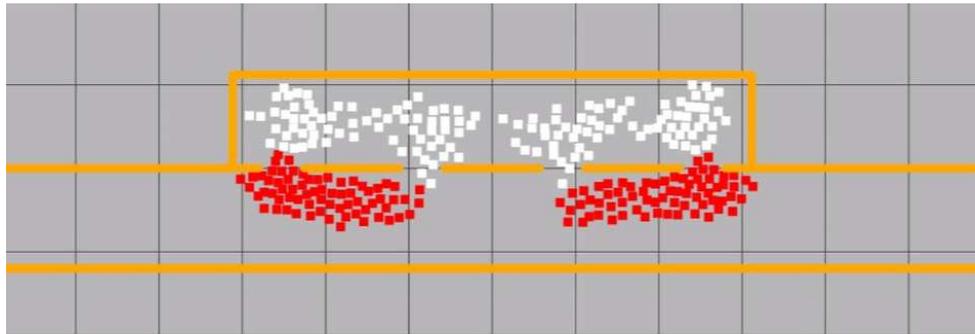


Figura 49: **Simulación.** Los pasajeros empiezan a ubicarse en las entradas y salidas, los blancos se preparan para bajar, mientras que los rojos se disponen a subir.

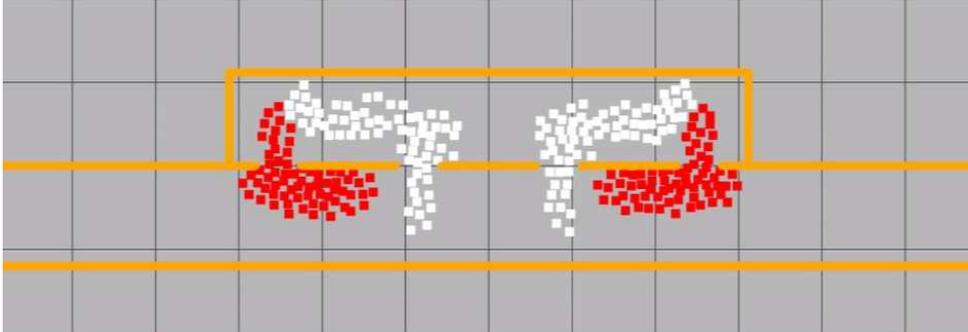


Figura 50: **Simulación.** Con esta configuración se observa la formación de un flujo interno circular, el ascenso y descenso genera poca fricción; se asemeja a la dinámica de las terminales.

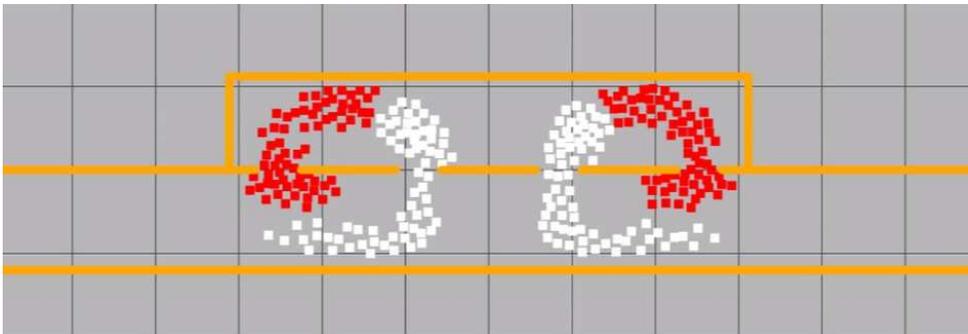


Figura 51: **Simulación.** Los pasajeros en blanco libran el cúmulo de rojos que aún están por entrar.

La estrategia funciona bien cuando son casos extremos (todos bajan y todos suben), sin embargo se tiene que considerar los patrones de viaje de la línea; por ejemplo, a lo largo de la línea hay estaciones con gran flujo de salida, supongamos que un 30 % de los usuarios que suben en Pantitlán bajan hasta Balderas o Salto del Agua, por conveniencia se ubicarán cerca de las dos puertas de salida, lo que implica que al menos la mitad de la línea estarán obstruyendo a los demás usuarios en la movilidad interna del vagón, dificultando llegar a las puertas exclusivas de salida, aunque el proceso de ascenso y descenso no tendría obstrucciones. En grandes saturaciones, como en las horas pico, la movilidad interna del vagón se verá reducida.

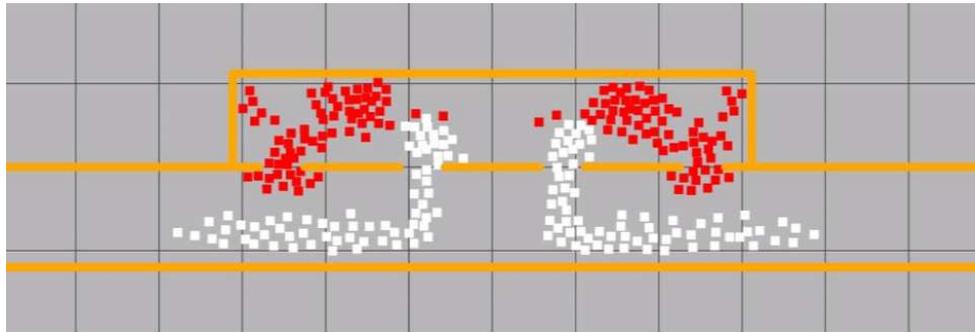


Figura 52: **Simulación.** Los usuarios rojos empiezan a repartirse por los espacios vacíos del tren. Los usuarios blancos casi han terminado de salir del vagón.

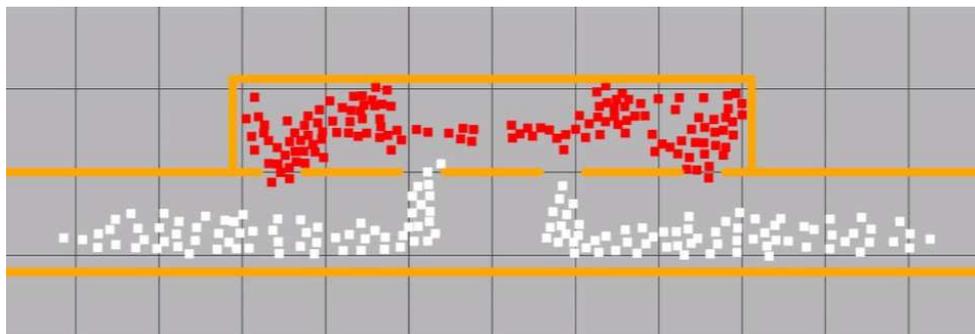


Figura 53: **Simulación.** El proceso de ascenso y descenso ha terminado.

5.7. Comparación de estrategias

Los dos métodos presentan ventajas y desventajas, su buen funcionamiento depende del comportamiento de los usuarios, el método de líneas guía necesita que se respeten los tiempos de descenso de los pasajeros; el método de puertas dedicadas necesita que los usuarios se muevan internamente en la vagón hasta las zonas de descenso.

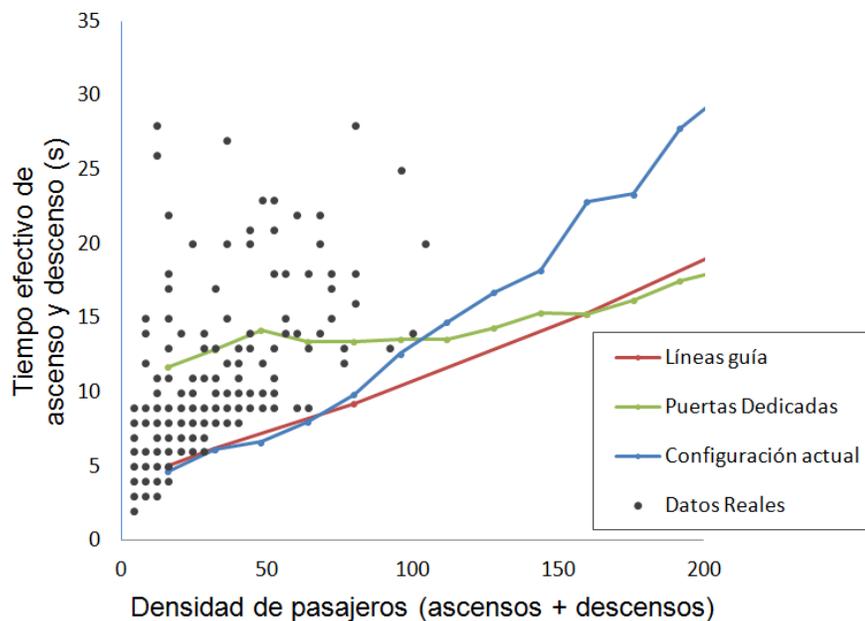


Figura 54: **Comparación de métodos de regulación con datos reales.** Se comparan las dos estrategias contra la configuración actual y datos reales. En la configuración actual hay un tiempo de espera de 2 a 3 segundos, para que permitan la salida de los pasajeros, de lo contrario chocarían inevitablemente y los tiempos crecerían demasiado.

En la Fig. 54 se muestran los resultados comparativos entre las dos estrategias de regulación, el caso actual y los datos reales del tiempo efectivo de ascenso y descenso. Los experimentos en todas las situaciones representan casos extremos donde todos los pasajeros en el interior del vagón desean bajar y todos los pasajeros en la plataforma desean subir. La construcción de los

88 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros

experimentos constituyen los casos base con menos fricción ya que no hay obstrucciones en el interior del vagón, por lo tanto, definen la cota mínima de tiempos invertidos, es decir son ascensos y descensos tipo terminal.

Se puede observar que la curva de la configuración actual ajusta bien a la cota mínima de los datos reales. Por otro lado, el método de puertas dedicadas tiene un rendimiento pobre en densidades bajas debido al tiempo que necesitan invertir los pasajeros para trasladarse de una puerta a otra, sin embargo, en densidades altas y después de una densidad crítica se iguala al rendimiento de los señalamientos guía.

La configuración de líneas guía trabaja bien para todas las densidades. Para densidades muy pequeñas se comporta como el método actual (con espera de 2 o 3 segundos) ya que el espacio de la puerta permite que puedan bajar y subir simultáneamente aún de forma desorganizada. Para densidades altas empieza a notarse el beneficio de acomodar a los pasajeros en cúmulos, ya que al arribar el tren los pasajeros ya están organizados y solo necesitan esperar un poco para la formación de flujos de entrada y de salida. Se obtiene una reducción del tiempo efectivo de ascenso y descenso para densidades altas de hasta un 30 %, y para densidades medias de un 10 a 20 %. Además de bajar las tasas del TEAD, se plantea una organización donde los empujones y las fricciones se reducen significativamente.

5.8. Discusión

La estrategia “Señalamientos guía en plataforma” es viable para su implementación en el Sistema de Transporte Colectivo Metro, ya que con pocos recursos se podría llevar a cabo la intervención. Se debe considerar una estación de alta afluencia y equilibrada en el número de ascensos y descensos para ver la formación de flujos; existen varias estaciones de este tipo, por ejemplo, las de transferencia. Además, con base en evidencia empírica (videos), se ha observado que algunos de los pasajeros aplican estas estrategias de manera personal, esperan al tren donde justamente quedará la puerta, se colocan en el lateral de la puerta, esperan a que las personas bajen y después suben por el costado. En ocasiones sucede esta dinámica, en otras, simplemente hay choques y obstrucciones.

La implementación de la estrategia “Puertas dedicadas” es mucho más costosa en todos los sentidos ya que se tendría que informar y educar a los usuarios para cumplir las reglas de la estrategia: avanzar a las puertas exclusivas de salida y en plataforma ubicarse en las puertas de entrada, también apoyados por algún señalamiento en la plataforma. Se requiere de una participación alta de los pasajeros, aunque siempre estará el beneficio individual de romper la regla y bajar por las salidas donde no habrá interferencias, como sucede en el trolebús o RTP.

Con la simulación computacional y los datos obtenidos se planteó a la administración del Metro de la Ciudad de México la implementación de la estrategia “Señalamientos guía en plataforma”.

En el próximo capítulo, se presentan los detalles de la intervención en la estación Balderas de la Línea 1, los resultados y los beneficios obtenidos.

90 Métodos de regulación para el ascenso y descenso de pasajeros

Capítulo 6

Intervención en el Sistema de Transporte Colectivo Metro

En el capítulo anterior se mostró a través de simulaciones computacionales y datos empíricos los posibles beneficios y la viabilidad de aplicar la estrategia de regulación de pasajeros “Señalamientos guía en plataforma”.

Las autoridades del Sistema de Transporte Colectivo Metro, el Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación de la Universidad Nacional Autónoma de México y el proyecto CONACYT 212802 “Guiando Comportamientos para Mejorar la Movilidad Urbana” otorgaron el apoyo y las facilidades para llevar a cabo esta intervención.

Los objetivos de la intervención son: 1. crear y regular flujos de pasajeros en el ascenso y descenso a través de señalamientos guía en plataforma; 2. minimizar el tiempo efectivo de ascenso y descenso; 3. evitar obstrucciones en el descenso; 4. minimizar los accidentes y empujones y 5. disminuir los retrasos en el cierre de puertas.

La intervención se dividió en cuatro fases: preparación, instalación, desarrollo y resultados. A continuación se describe cada una de ellas.

6.1. Fase de preparación

La estación Balderas de la Línea 1 es ideal para implementar la estrategia de regulación debido a los patrones de viaje de los usuarios; presenta un

gran flujo de descenso por las mañanas en la dirección Observatorio, lo que beneficia a los pasajeros que se encuentran en la plataforma ya que permite ascensos grandes; por su parte, en la dirección hacia terminal Pantitlán el flujo es moderado. En la tarde o noche los flujos se invierten, hacia Observatorio la afluencia es baja y hacia Pantitlán es alta. La Fig. 55 muestra la serie de tiempo del número de ascensos y descensos en horario pico matutino de 6:00 a 9:40 am.

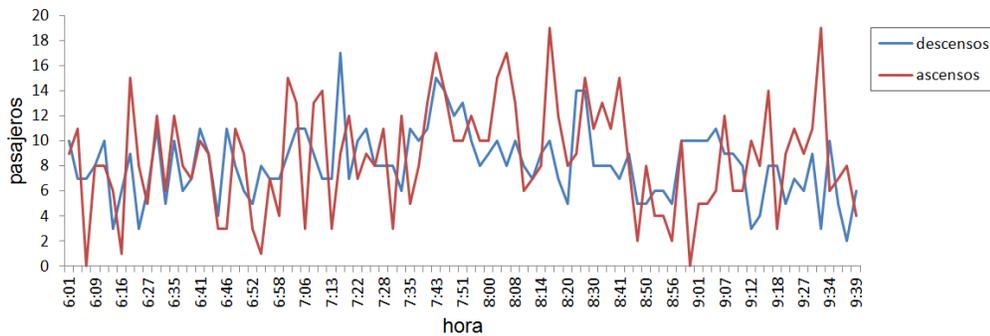


Figura 55: **Número de ascensos y descensos en una puerta en la estación Balderas antes de la intervención.** La serie de descensos y ascensos tiene un promedio de 8.2 y 8.7 pasajeros por evento respectivamente.

6.1.1. Diseño de los señalamientos guía en plataforma

Se plantearon diferentes diseños de los señalamientos con la finalidad de resaltar alguna propiedad en particular; por ejemplo, las líneas de contención, en las cuales se modificó la forma, la inclinación y las posiciones de las flechas (ver Fig. 56); las áreas de espera (ver Fig. 57) y áreas guía en plataforma conectadas con el interior del vagón para tener una solución más ergonómica (ver Fig. 58).

El diseño final del señalamiento estuvo a cargo de la L. D. I. Tania Pérez Jiménez, en el cual se consideró el costo, beneficio y observaciones por parte de los directivos del Metro. Los señalamientos están constituidos por 5 elementos, dos líneas guías rectas a 90° respecto a la línea de vida, tres

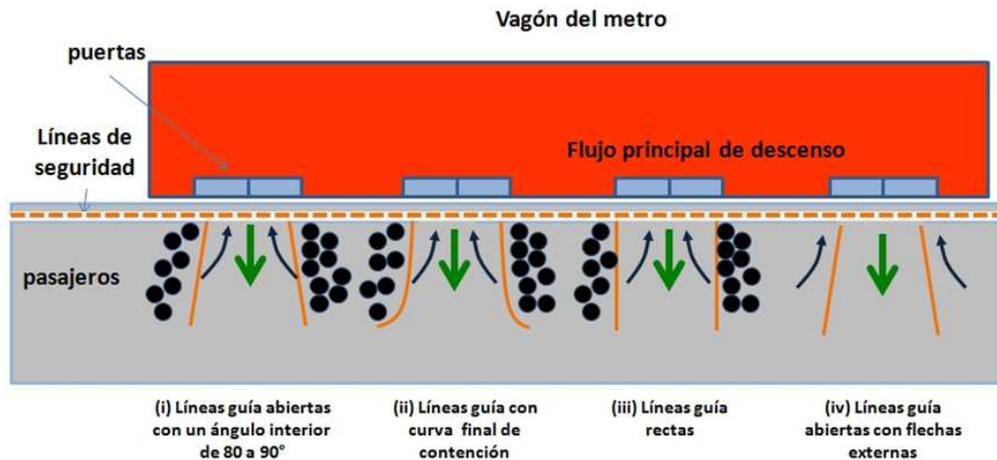


Figura 56: Diseños de las líneas de contención.

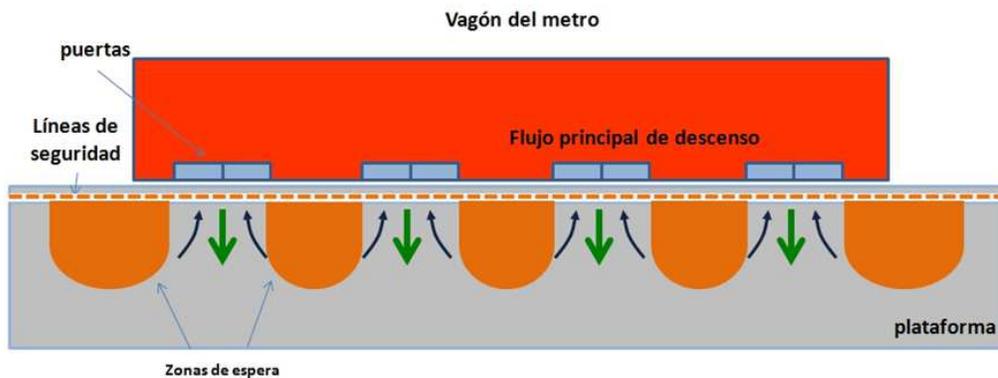


Figura 57: **Propuesta de señalamiento con zonas de espera.** Los pasajeros usarían las zonas naranjas para esperar la llegada del tren; la instalación y el costo de los materiales se incrementarían.

circunferencias para indicar el área de descenso y una área rectangular en negro que dice “ÁREA DE ESPERA” con una flecha inclinada a 45° apuntando hacia el extremo de la puerta para indicar el ascenso (Fig. 59). Los señalamientos están impresos sobre el material floor graphic, el cual es un vinil resistente y antiderrapante para pisos en exterior; es de fácil instalación ya que tiene una capa adhesiva para fijarse en el suelo.

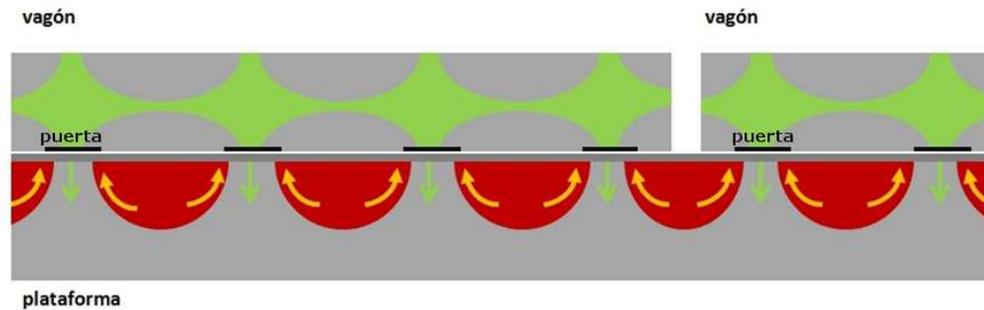


Figura 58: **Propuesta de señalamientos con zonas diferenciadas.** Los señalamientos en plataforma se conectan ergonómicamente con los señalamientos del piso del vagón. Podría ir acompañado de leyendas para fomentar la preparación del descenso. La instalación requeriría una mayor inversión.

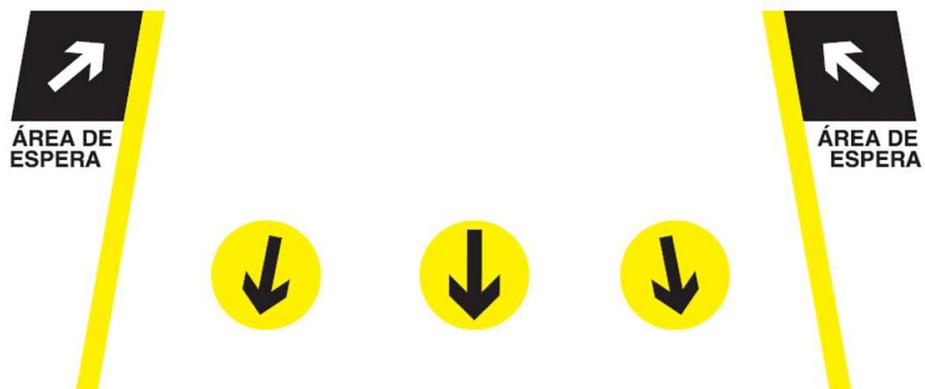


Figura 59: **Diseño final del señalamiento.** Distribución de los elementos, el color amarillo y negro son utilizados en señalización urbana.

de mantenimiento en la infraestructura, sistemas de frenado y sobrecarga del tren, existe una desviación estadística respecto a este punto de paro. Se tomó una muestra representativa de la posición de alto total de los trenes en las estaciones respecto a la primera puerta del primer vagón para establecer un punto de paro promedio. Esto ayudó para establecer el *punto normal de paro promedio* y usarlo como inicio para fijar las medidas de la plantilla.

La instalación de los 72 señalamientos se realizó del 3 al 4 de diciembre de 2016 (Fig. 61, 62).

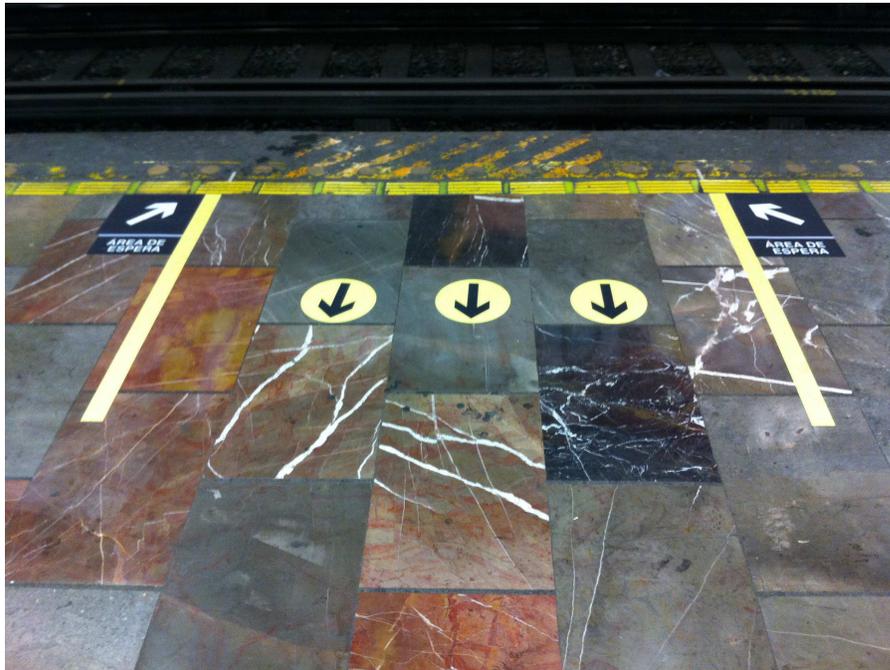


Figura 61: Señalamiento instalado en plataforma.

Se instalaron dos mantas en las principales entradas de la estación Balderas para informar y orientar a los pasajeros del estudio piloto a realizarse. En la Fig. 63 se muestran el diseño que se utilizó para la difusión del estudio piloto.



Figura 62: **Equipo de trabajo para la instalación de los señalamientos.** De izquierda a derecha, Regina Rosas, Marco Rosas, César González, Jair Castruita, Jesús Enrique Hernández, Gustavo Carreón, Carlos Gershenson, Christopher Chávez, David Antúnez, Vicente Carrión, Carlos Antonio Hernández y Tania Pérez. Se invirtió 6 horas en la instalación de los 72 señalamientos.



Figura 63: **Diseño de la manta y de los volantes para la difusión.** En el MXM el proyecto tuvo el nombre “Antes de entrar permita salir”, en redes sociales se difundió como #Metrevolución. El diseño estuvo a cargo de Axel Razo, personal del MXM. Se invita al lector a ver los spots del proyecto en el canal de YouTube: https://www.youtube.com/channel/UCONKP8A1HN_D4pGX9HGu6mw.

6.3. Fase de intervención

El estudio piloto se realizó durante 2 semanas del 5 al 16 de diciembre de 2016. Se realizaron grabaciones de 6:00 am a 10:00 am en días hábiles para tener un registro de la dinámica y la evolución de la intervención, así como para procesar y obtener datos para realizar comparaciones y medir el posible beneficio. Se colocaron 2 cámaras marca GoPro en la plataforma, una en la sección de mujeres y niños, y la otra en la sección mixta. Se obtuvieron por cada cámara aproximadamente 40 horas de video. Por otro lado, se solicitó el apoyo a la administración del MXM para que asignaran elementos de protección civil y policías, con el fin de informar y orientar a los pasajeros en la aplicación de la intervención.

Durante la intervención se observaron las siguientes características:

1. La mayoría de los usuarios necesitaron de información y orientación para usar los señalamientos; algunos los notaban pero no los seguían, otros lo hacían por sí solos. El cambio de reglas de interacción a través de los señalamientos generó diversas opiniones de los pasajeros, entre agradecimientos y apoyo al programa, hasta descontento y falta de interés; sin embargo día con día se fue reforzando el uso de los señalamientos.
2. Los usuarios desde el primer día crearon filas de manera espontánea y autónoma. La sugerencia de uso fue posicionarse en el área de espera sin ningún acomodo en particular; sin embargo, los cuadros negros de los señalamientos se usaron para encabezar la fila y las líneas amarillas como guía. Las filas llegaron a ser tan largas situándose en el espacio disponible en la plataforma. En el área mixta se pudieron formar filas con capacidad de 8 a 9 pasajeros; en momentos de saturación se podían formar dos filas por área de espera del señalamiento. En el área de mujeres se podían formar hasta 30 o más pasajeros por fila debido a la estructura de la estación, ya que la plataforma se conecta con la entrada principal. Las filas se mostraron robustas, no se rompían a pesar del retraso que podían presentar los trenes; la gente permanecía formada hasta tocar su turno para ascender. En la Fig. 64 y 65 se muestran ejemplos de las formaciones en distintos lugares de la estación Balderas.
3. La regulación del ascenso y descenso fue la esperada, los pasajeros que descendían caminaban entre las dos filas de personas, y una vez que

bajaban todos, las dos filas subían simultáneamente hasta ocupar todo el espacio disponible del vagón. Al formarse los pasajeros disminuyeron los choques y empujones drásticamente; así como los accidentes, las obstrucciones en las puertas y los intentos por abordar en situaciones totalmente saturadas. Hubo una reducción en los casos de pasajeros “necios” gracias a dos factores; el primero, porque los pasajeros pudieron esperar en la fila con la seguridad de subir en el siguiente tren, y el segundo, porque el orden hizo evidente los malos comportamientos con la consecuencia de poder exhibirlos y sugerirles apegarse a las nuevas reglas de interacción.

4. En un principio, los pasajeros percibieron que al formarse se incrementaría su tiempo de espera y sería difícil su ascenso ya que la gente podría no respetar su lugar; sin embargo, los pasajeros regulares notaron que tenían que esperar dos o tres trenes en momentos de saturación para subir (de 4 a 6 minutos con un servicio regular). El beneficio de esperar y no atropellar a los pasajeros como antes, resultó en un beneficio colectivo y no solo individual.
5. Con los señalamientos se les proporcionó al usuario la información exacta de las zonas para abordar al tren y el poder de decisión para buscar un área menos congestionada. Se observó que los usuarios buscan filas más cortas de manera local pero no se mueven grandes distancias; los accesos principales se congestionan más, pero como las plataformas se conectan con los pasillos se forman filas más grandes, los usuarios prefieren estas regiones.
6. Debido a esta nueva dinámica nunca antes vista en el MXM, los medios de información, prensa, televisión, radio y redes sociales cubrieron la nota. El interés creció durante el estudio piloto y se ha mantenido vigente gracias a que el programa tuvo resultados satisfactorios; actualmente se ha extendido a otras estaciones. Se invita al lector a visitar el canal de YouTube <https://www.youtube.com/channel/UC5gGv0aX0cRtLyUqLPk-0TA/> donde encontrará videos comparativos entre la dinámica actual y anterior, el surgimiento de las filas en el área de mujeres y la sección mixta.



Figura 64: **Surgimiento de filas en el MXM.** Esta fotografía tomada durante el estudio piloto fue utilizada en la portada de Gaceta UNAM del 13 diciembre de 2016; puede consultarla en formato PDF en <http://www.gaceta.unam.mx/20161213/wp-content/uploads/2016/12/131216.pdf>). Fotografía de Gustavo Carreón.



(A)



(B)

Figura 65: Ejemplos de formación de filas en distintos espacios de la estación Balderas. (A) Área de niños y mujeres. Es posible hacer filas muy grandes por el vestíbulo que existe hacia una de las salidas de la estación. (B) Área mixta. El grosor de la plataforma es de alrededor de 3 metros lo que permite la formación de hasta 8 o 9 pasajeros.

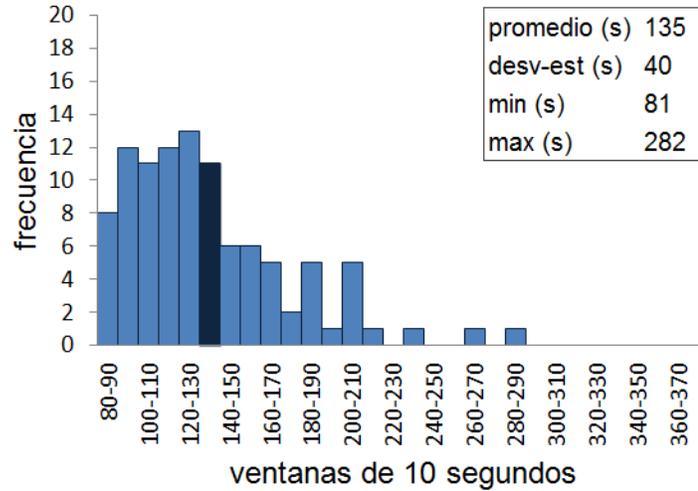
6.4. Fase de Resultados

En la sección anterior se describió parte de la nueva dinámica que surgió a través de los señalamientos; ahora se presentará un análisis comparativo entre la dinámica anterior y la actual utilizando las distribuciones del headway, el tiempo efectivo de ascenso y descenso, el retraso de puertas y el tiempo de estacionamiento.

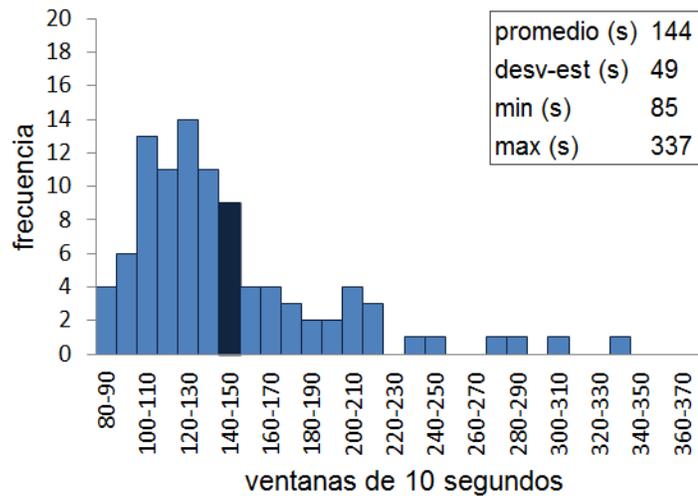
El 20 y 26 de octubre de 2016 se realizaron grabaciones de 6:00 am a 10:00 am en horario pico matutino en la estación Balderas de la Línea 1 para tener una muestra de la dinámica y del desempeño de los trenes; después de procesar los videos y obtener los tiempos representativos se realizó una comparación con dos días representativos de la intervención, 6 y 9 de diciembre de 2016.

6.4.1. Intervalos

Como se mencionó anteriormente el headway se considera una medida de desempeño del sistema de carácter global. Los histogramas muestran la dispersión de intervalos y el grado de regulación del sistema. En la Fig. 66 y 67 se muestran los histogramas del headway compuestos de intervalos de 10 segundos; se conserva la misma escala con el fin de representar y comparar propiedades cualitativas. A partir de estos datos se observa que los días del estudio piloto fueron más problemáticos; hay mas dispersión en los datos como lo muestra el promedio y la desviación estándar. Las series de tiempo de los días 20 de octubre (el promedio de intervalo más bajo) y del 9 de diciembre (el promedio de intervalo más alto) muestran el fenómeno de la inestabilidad del intervalo (ver Fig. 68). Es difícil medir los beneficios de los señalamientos en una escala global del sistema ya que están instalados solo en una estación; sin embargo, se notan máximos entre los 100 y 130 segundos, lo que podría indicar que se generó una nueva dinámica local que fomenta la disminución del tiempo en estación.

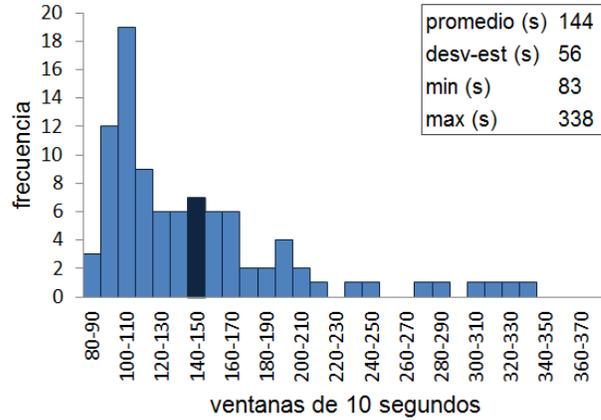


(A)

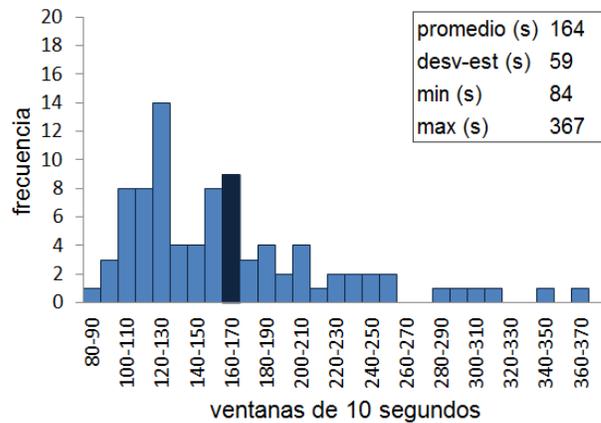


(B)

Figura 66: **Histogramas del headway de la estación Balderas antes de la instalación de los señalamientos.** (A) Octubre 20. El histograma se compone de 101 mediciones, la barra en azul oscuro indica el promedio en 135 segundos. (B) Octubre 26. El histograma se compone de 96 mediciones. Los datos exhiben mucha variabilidad debido a que el headway representa los impactos o perturbaciones en la línea, se notan eventos largos provocados por mal funcionamiento o sobresaturación.

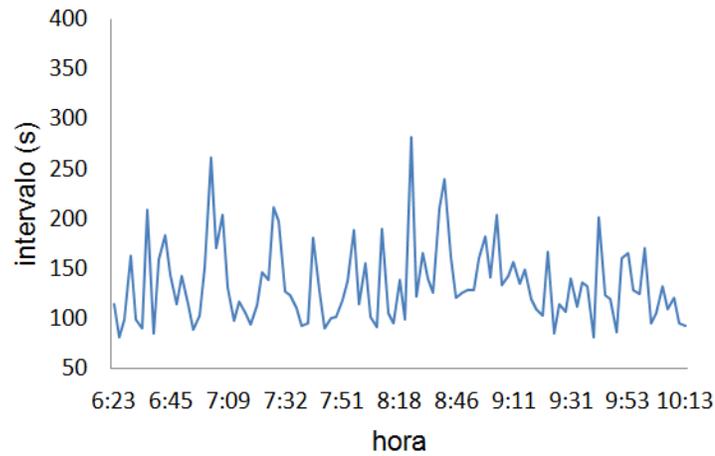


(A)

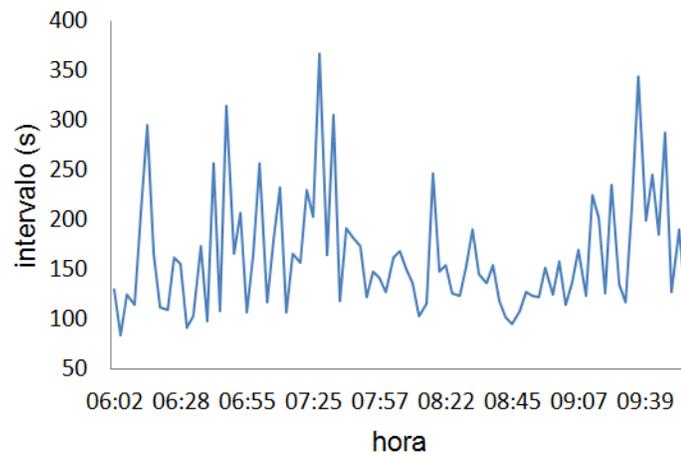


(B)

Figura 67: **Histogramas del headway de la estación Balderas después de la instalación de los señalamientos.** (A) Diciembre 6. El histograma se compone de 93 mediciones. Los eventos más frecuentes se encuentran en el intervalo 100-110 segundos; existe una disminución en los eventos de más de 120 segundos; sin embargo los eventos con valores grandes impactan negativamente el desempeño debido a fallas mecánicas o mala regulación. (B) Diciembre 9. El histograma se compone de 87 mediciones y se nota una dispersión importante; hay intervalos largos de más de 6 minutos. El máximo está en la ventana 120-130 segundos, lo que implica que existen dos dinámicas combinadas, por un lado se cumple por momentos el intervalo de frecuencia de los dos minutos, y por otro, hay retrasos importantes por factores externos.



(A)



(B)

Figura 68: **Serie de tiempo del headway.** (A) Día 20 de octubre sin señalamientos. La serie muestra mucho ruido y fluctuaciones con una cota inferior de 81 segundos y una superior de 282 segundos. (B) Día 9 de diciembre con señalamientos. El mínimo y máximo intervalo es de 84 y 367 segundos respectivamente. La diferencia entre las dos series es el tamaño de las fluctuaciones ya que no presenta algún orden o regularidad. Son series del headway características de la dinámica del MXM.

6.4.2. Tiempo efectivo de ascenso y descenso

El tiempo efectivo de ascenso y descenso (TEAD) permite medir el tiempo invertido de los pasajeros en subir y bajar e identificar los casos problemáticos producidos por pasajeros necios. Como se mencionó anteriormente el 91 % de los pasajeros se encuentran en los flujos principales de intercambio, lo que resulta en una medida adecuada para medir el desempeño. En la Fig. 69 y 70 se comparó el día 6 de diciembre (señalamientos) contra el 20 y 26 de octubre respectivamente (sin señalamientos). Los valores altos del TEAD en densidades bajas corresponden a comportamientos de pasajeros necios.

Es importante notar que el orden producido por los señalamientos fomenta una conducta de espera en la plataforma ya que el pasajero tiene la certeza de que en el próximo o en los subsecuentes trenes podrá subir. Se observa que en ambas comparaciones se minimizan las conductas no deseables ya que los pasajeros no quieren perder su lugar en la fila y porque si son abusadores o ventajosos pueden ser exhibidos con mayor facilidad.

El beneficio conmensurable se puede observar en las gráficas: una reducción del tiempo efectivo de ascenso-descenso de 10 a 15 %, sin embargo la dinámica que se desarrolla en la plataforma es cualitativamente distinta. Un reflejo del orden y la organización es la posibilidad de separar los tiempos de ascenso y descenso, como se muestra en la Fig. 71.

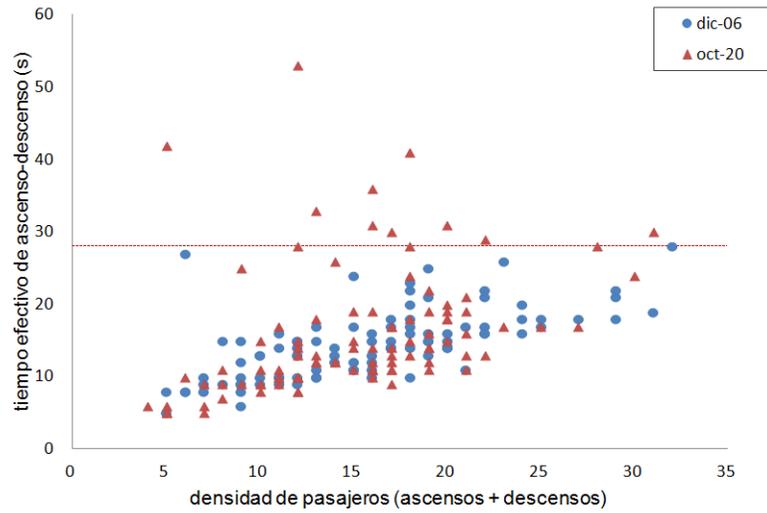


Figura 69: **TEAD en el área de mujeres de la estación Balderas-L1.** Comparación del día 6 de diciembre contra el 20 de octubre de 2016. Los valores altos del TEAD en densidades bajas son producto del comportamiento de los pasajeros necios, aunque el vagón se encuentre saturado, tratan de subir. La línea roja punteada en 28 segundos establece una cota del tiempo máximo registrado con señalamientos. El promedio del TEAD con señalamientos es de 14.5 segundos mientras que sin señalamientos es de 16 segundos lo que implica una mejora del 10% en este día y horario en particular. Se nota claramente como el comportamiento de los pasajeros necios se minimiza.

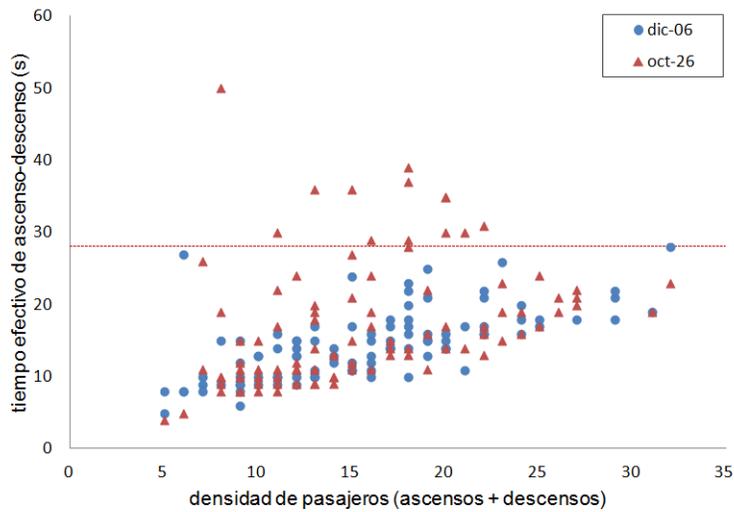
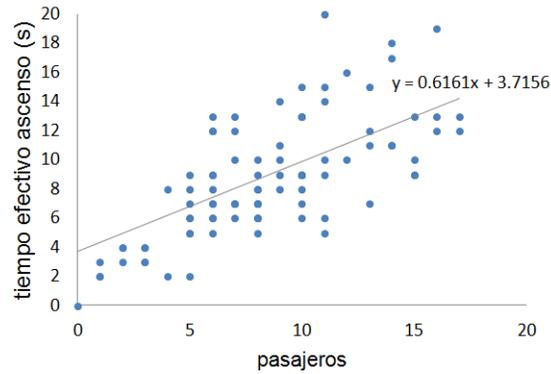
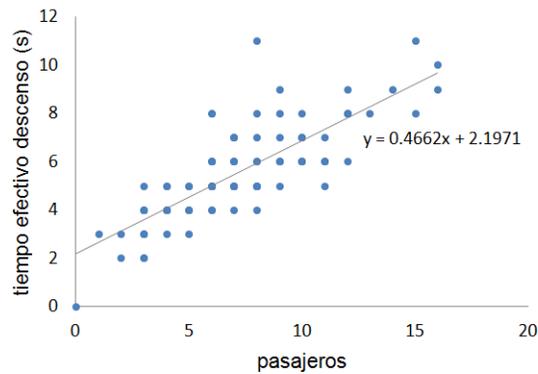


Figura 70: **TEAD en el área de mujeres de la estación Balderas-L1.** Comparación del día 6 de diciembre contra el 26 de octubre de 2016. El promedio del TEAD sin señalamientos es de 17.1 segundos lo que implica una mejora del 15% en este día en particular. También se nota como disminuye el comportamiento de los pasajeros necios.



(A)



(B)

Figura 71: **Separación del tiempo efectivo de ascenso y descenso.** Los datos considerados son del día 6 de diciembre con señalamientos; la gráfica de ascensos (A) se ajusta por medio de una línea de pendiente 0.6 y ordenada 3.7; los tiempos de descenso (B) por una línea de pendiente 0.4 y ordenada 2.1. La gráfica de descensos se nota más compacta y ajustada a la ecuación lineal, lo que implica que hay pocas obstrucciones; el ascenso es más intrincado, ya que depende de la distribución en el interior del vagón. En el descenso existe un caso de obstrucción que se presenta cuando los pasajeros que están en la puerta no bajan; la solución es un reacomodo previo o bajarse del vagón y orillarse; sin embargo, hay casos donde no se mueven creando un descenso con fricciones.

6.4.3. Tiempo de cierre de puertas

Se propone el tiempo de cierre de puertas (TCP) como un indicador del desempeño del metro asociado al comportamiento de los pasajeros; el mecanismo de la puerta cierra en dos segundos, mientras que, si hay pasajeros obstruyendo puede incrementarse notablemente; también existen los casos en los que el operador abre nuevamente las puertas porque no puede partir debido a factores externos a la estación, aunque en este caso se reanuda el proceso de abordaje. En las Figuras 72 y 73 se comparan dos series del retraso en cierre de puertas, se considera el 20 de octubre de 2016, sin señalamientos y el 6 de diciembre, con señalamientos, respectivamente.

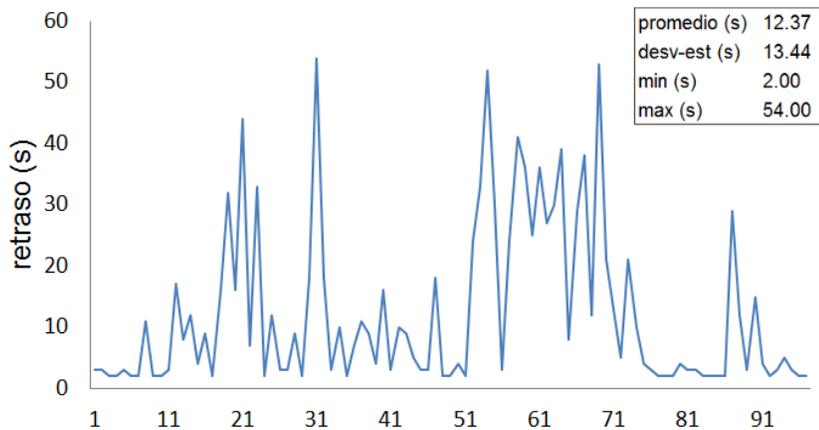


Figura 72: **Serie de tiempo del retraso en el cierre de puertas del día 20 de octubre sin señalamientos** El promedio de tiempo del cierre de puertas se encuentra en 12.37 segundos, es de esperarse que existan eventos sin obstrucciones de 2 segundos, sin embargo el máximo se encuentra en 54 segundos. En una etapa de la mañana fue muy complicado ya que se notan retrasos importantes. De los días considerados en la muestra, este tuvo el mejor headway promedio (135 segundos), lo que indica que la línea de manera global tenía un buen desempeño; sin embargo, localmente, surgían retrasos.

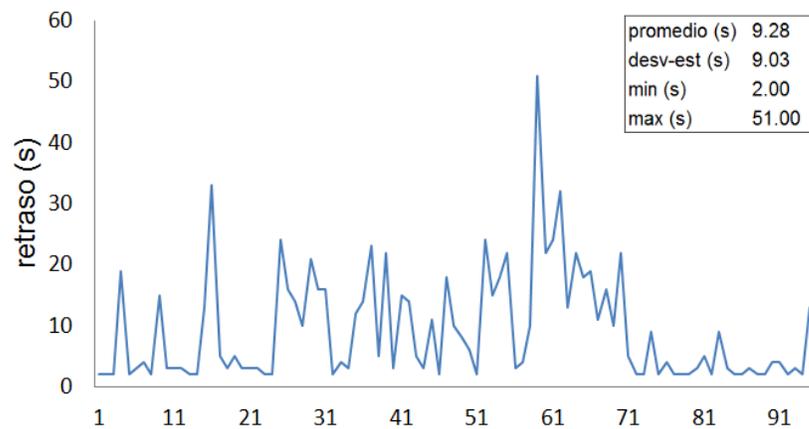
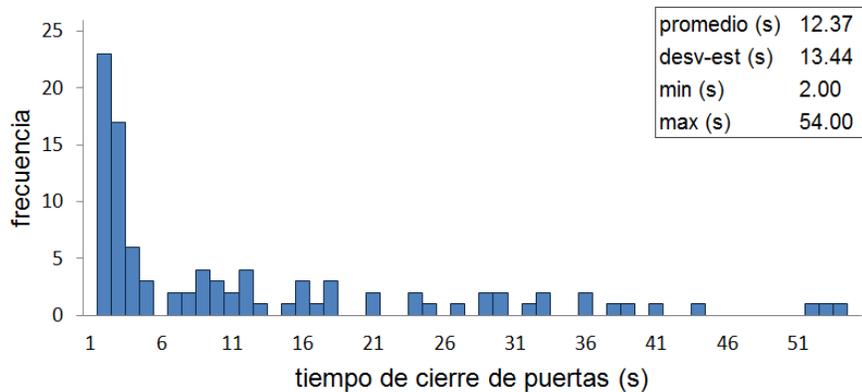
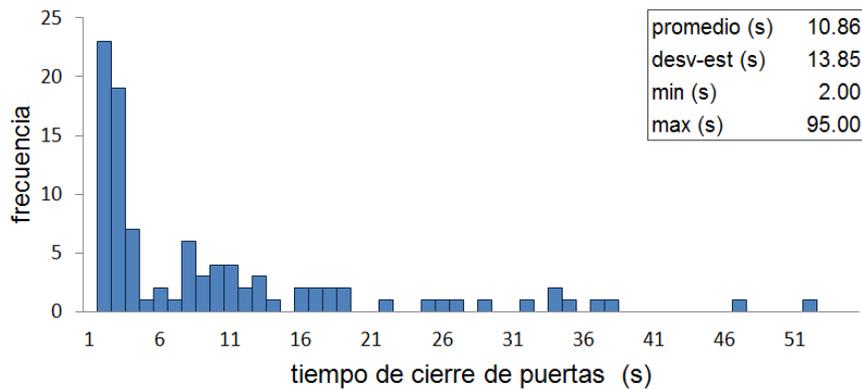


Figura 73: **Serie de tiempo del retraso en el cierre de puertas del día 6 de diciembre con señalamientos** El promedio del tiempo de cierre de puertas se encuentra en 9.28 segundos, hubo una reducción del 25 % en comparación con el día 20 de octubre.

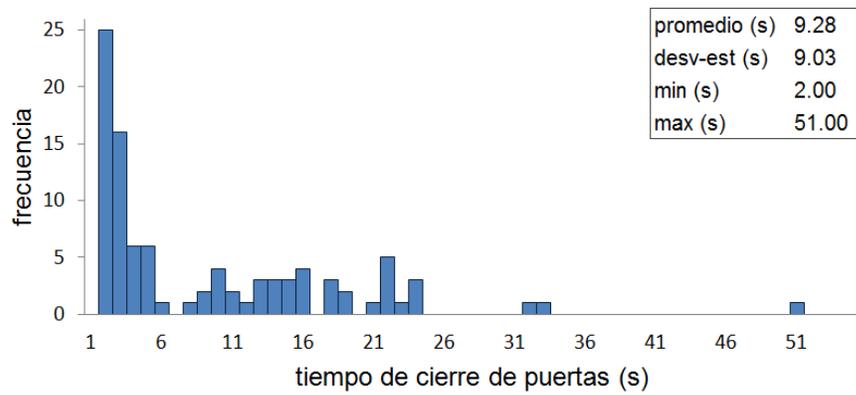
En la Fig. 74 se muestran la comparación de los histogramas del TCP de los días 6 de diciembre (con señalamientos) contra el 20 y 26 de octubre (sin señalamientos) en horario pico por la mañana. Hay una reducción del retraso en cierre de puertas de 15 a 25 %. Muchos de los retrasos surgen por los casos de pasajeros necios, su conducta afecta el proceso de ascenso-descenso y el de cierre de puertas. En ocasiones se observó que los mismos pasajeros ayudan a los que se quedan atorados en las puertas, esto es fomentado por el orden que existe en la plataforma.



(A)



(B)



(C)

Figura 74: **Comparación de histogramas del TCP.** Días 20 y 26 de octubre sin señalamientos, (A) y (B) respectivamente. Después de los 25 segundos hay eventos importantes, se presenta un evento de 95 segundos no mostrado en el histograma (B). (C) Día 6 de diciembre con señalamientos. La reducción del tiempo promedio respecto al histograma (A) es de 25 % y de (B) es de 15 %. Disminuyen los eventos grandes.

6.4.4. Tiempo de estacionamiento

El tiempo de estacionamiento se compone de los tiempos de ascenso y descenso, el de cierre de puertas y de los retrasos; hay eventos en el MXM donde estos tiempos son adecuados pero el retraso en la partida desajusta el tiempo programado de estacionamiento (alrededor de 24 segundos por opiniones recabadas con los ingenieros del MXM). En la Fig. 75 se muestran los tiempos de estacionamiento de aproximadamente 95 trenes en horario matutino de los días 6 de diciembre con señalamientos y del 20 de octubre sin señalamientos. El día considerado para los señalamientos fue impactado negativamente a lo largo de la mañana por seis eventos arriba de los 150 segundos. Esto muestra que es indispensable separar los tiempos para analizar donde impactan positivamente los señalamientos.

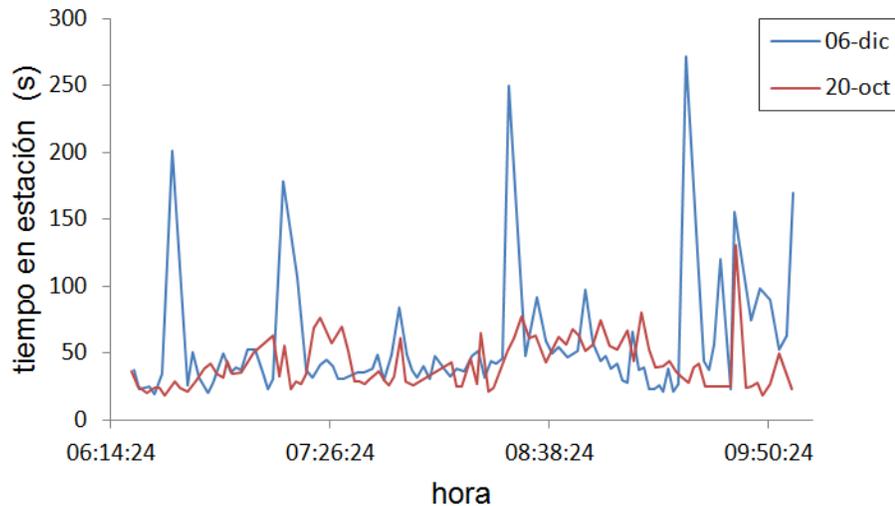
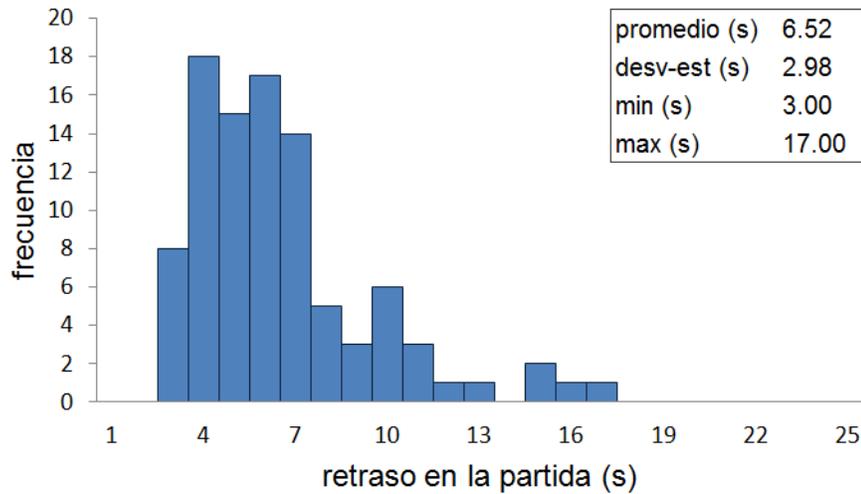
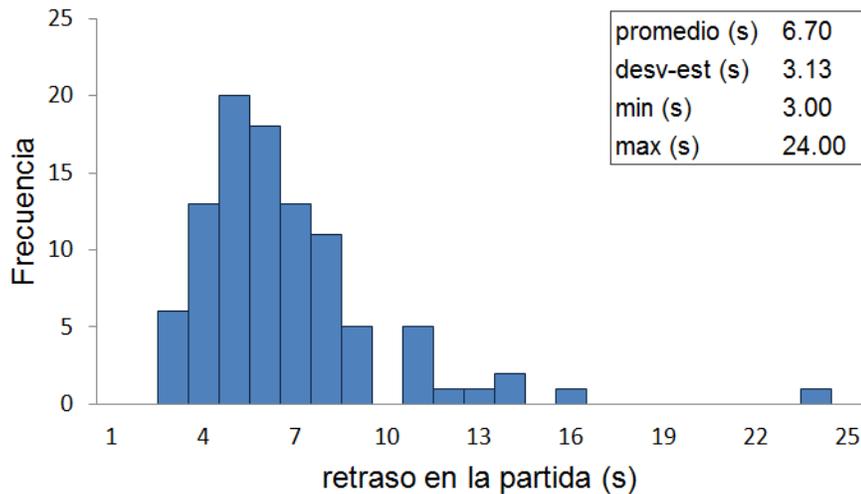


Figura 75: **Tiempo de estacionamiento.** El día 6 de diciembre fue muy complicado debido a retrasos muy prolongados por factores que no se atribuyen a la dinámica de la estación; su promedio se encuentra en 54.14 segundos con una desviación estándar de 45.08, mientras que el 20 de octubre presentó un promedio de 40.57 y desviación estándar 18.59. De acuerdo a personal de operación del Metro los tiempos óptimos de estacionamiento deberían rondar los 24 segundos, pero éstos no se cumplen.

El último tiempo considerado en este análisis es el retraso de la partida de los trenes, que inicia cuando el tren cierra definitivamente sus puertas hasta que establece la marcha. En la Fig. 76 se muestran los histogramas de los retrasos con y sin señalamientos de los días 6 de diciembre y 20 de octubre respectivamente. El comportamiento de este intervalo de tiempo es independiente de los señalamientos; los histogramas son muy parecidos y exhiben un coeficiente de correlación de Pearson de 0.916. La correlación es muy alta para dos días que fueron cualitativamente distintos en sus tiempos y dinámicas locales, lo que posiblemente indica que el mecanismo de salida, ya sea automático o manual, presenta algún desajuste o retardo que se comporta de manera independiente de los demás eventos.



(A)



(B)

Figura 76: **Retraso en la partida del tren.** (A) Día 6 de diciembre con señalamientos. (B) Día 20 de octubre sin señalamientos. El tiempo óptimo para partir después del cierre de puertas es de 3 segundos; una vez cumplido este tiempo se puede considerar como retraso. Existen eventos largos de más de 20 segundos. Los dos histogramas exhiben un coeficiente de correlación de Pearson de 0.91.

6.5. Discusión

El estudio piloto generó resultados satisfactorios, tanto de forma cualitativa como cuantitativa. Las gráficas anteriores muestran los intervalos de tiempo donde impactan positivamente los señalamientos; de manera local, en la estación, hay una reducción del tiempo efectivo de ascenso y descenso de 10 a 15 %, y una disminución de los retrasos en el tiempo de cierre de puertas de 15 a 25 %. De manera global, se observa que la estación Balderas actúa como un regulador ya que se fomenta la obtención de valores adecuados de los intervalos entre 2:00 a 2:10 minutos, lo que resulta sorprendente ya que con una sola estación se logra un efecto estabilizador; el beneficio se incrementaría si se instalaran a lo largo de toda la línea, el impacto sería mayor en las estaciones de transferencia.

Las gráficas comparativas involucran días representativos antes y durante el estudio piloto; no se pretendió dar una comparación exhaustiva ya que el procesamiento de los videos fue de forma manual y requirió de una gran inversión de tiempo recabar los datos; sin embargo, los resultados entre los días considerados son consistentes respecto a las mejoras observadas. Es vital segmentar los procesos para identificar patrones y comportamientos ya que el MXM presenta una inestabilidad importante en todos los tiempos, tales como, los valores de los intervalos, el tiempo efectivo de ascenso y descenso, el de cierre de puertas, el de partida, y por consiguiente, el tiempo de estacionamiento. Para conocer a más detalle el comportamiento de la línea 1 del MXM se invita al lector a consultar la tesina elaborada para el *Primer Premio a la Innovación Tecnológica “Juan Manuel Ramírez Caraza”* en el repositorio https://github.com/gcarreon/pts-simulator/blob/master/GustavoCarreon_Tesina_Metro.pdf, también producto de la investigación doctoral.

De manera cualitativa, los resultados son evidentes, la creación de las filas cambió la dinámica de ascenso y descenso en la estación Balderas. Existe un componente cultural muy fuerte alrededor de las filas en México; es una estructura robusta que una vez creada, pocos son capaces de violarla, o de forma colectiva, romperla. En los primeros días de la intervención, la generación espontánea de las filas resultó debido a dos componentes, el primero, por los avisos de uso de los señalamientos y de la información proporcionada por el personal de apoyo y, el segundo, por una dinámica

descentralizada por parte de los usuarios al encontrar las filas como la manera más sencilla de usar los señalamientos. Se observó un componente importante de imitación, por ejemplo, en la otra vía de la estación (dirección Pantitlán) no se consideró personal de apoyo para la intervención; sin embargo, las filas también surgieron. Debido a estas nuevas reglas de interacción se creó un orden nunca antes visto en el Metro y se incrementó sustancialmente la calidad del viaje.

Esta dinámica tiene los siguientes beneficios:

- La reducción casi en su totalidad de las obstrucciones en puertas, además de los empujones y fricciones entre pasajeros.
- La optimización del tiempo de espera de los pasajeros ya que de manera colectiva se creó una estructura FIFO (*First in, first out*), el primero en llegar, primero en salir.
- La disminución de los casos de pasajeros necios; en situaciones de sobresaturación pueden generar el retraso del tren impactando negativamente el tiempo de viaje de 1600 a 1700 pasajeros.
- El incremento en la seguridad de la estación, ya que la forma de operar de los delincuentes es aprovechar los tumultos y el desorden para despojar de sus pertenencias a los usuarios sin que lo noten.
- El uso de nueva información proporcionada a lo largo de la plataforma con el fin de que los usuarios decidan donde posicionarse y puedan buscar una zona menos saturada. Hay la certidumbre de la posición de estacionamiento del tren y se presenta la posibilidad de calcular de manera intuitiva el tiempo de espera a partir de las longitudes de las filas y la saturación de los vagones.
- La ganancia acumulativa de tiempo considerando el tiempo efectivo de ascenso-descenso y el tiempo de cierre de puertas. Entre estos dos tiempos se pueden ganar en promedio 4 segundos por evento; si en horario pico, por ejemplo, de 6:00 am a 10:00 am pasan alrededor de 100 trenes, habrá una ganancia de 400 segundos (6.6 minutos), lo que implica que podrán pasar 3 trenes más si presentan un intervalo aproximado de 2:20 minutos; al final se podrían transportar 5100 pasajeros más (1700 pasajeros por tren). Como comparativo, una

plataforma llena puede ser despachada por un tren vacío. En el estudio piloto se observó que la plataforma quedaba vacía por momentos en horario pico, lo que posiblemente se debió a estas pequeñas ganancias.

En el MXM la mayoría de los trenes exhiben un desgaste importante en su infraestructura; es necesario su mantenimiento sobre todo en el mecanismo de frenado, ya que de ello depende la seguridad de los pasajeros; cuando no está bien calibrado o requiere de composturas y mantenimiento el punto normal de paro presenta una desviación mayor a lo normal, lo que implica que el tren quede desfasado de los señalamientos. Esto resulta contraproducente ya que las filas se mueven y desorganizan, además de la molestia de los pasajeros. Para minimizar este problema inherente en el sistema, existen dos puntos a considerar: la instalación correcta de los señalamientos a partir del *punto normal de paro promedio* y el mantenimiento de los sistemas de frenado.

Se considera que la intervención fue el inicio de un cambio en la cultura de movilidad del pasajero; después de un año de funcionamiento del programa (de diciembre 2016 a diciembre de 2017), la gran mayoría de los pasajeros utilizan los señalamientos, hay usuarios que orientan a otros no familiarizados con el esquema, y se han visto formaciones espontáneas en estaciones donde no hay señalamientos (ver Fig.77), lo que implica una apropiación de una conducta de orden y una concientización sobre el uso de la infraestructura y la convivencia entre los pasajeros. Actualmente existen 14 estaciones integradas al programa (ver Cuadro 7) en las cuales se benefician a más de 400,000 pasajeros diariamente (Elaborado con datos de ISA TV [58]).

No. Estación - Línea	Afluencia* (pasajeros por día)
1. Balderas - L1	28,483
2. Balderas - L3	9,962
3. Candelaria - L1	29,170
4. Centro Médico - L3	28,227
5. Centro Médico - L9	17,161
6. Hidalgo - L3	25,434
7. Juárez - L3	25,149
8. Miguel Ángel de Quevedo - L3	39,558
9. Salto del Agua - L1	34,016
10. San Lázaro - L1	37,298
11. San Lázaro - LB	34,746
12. Tacubaya - L1	41,236
13. Zapata - L12	13,799
14. Zapata - L3	39,740
Total	403,979

Cuadro 7: Estaciones con señalamientos.

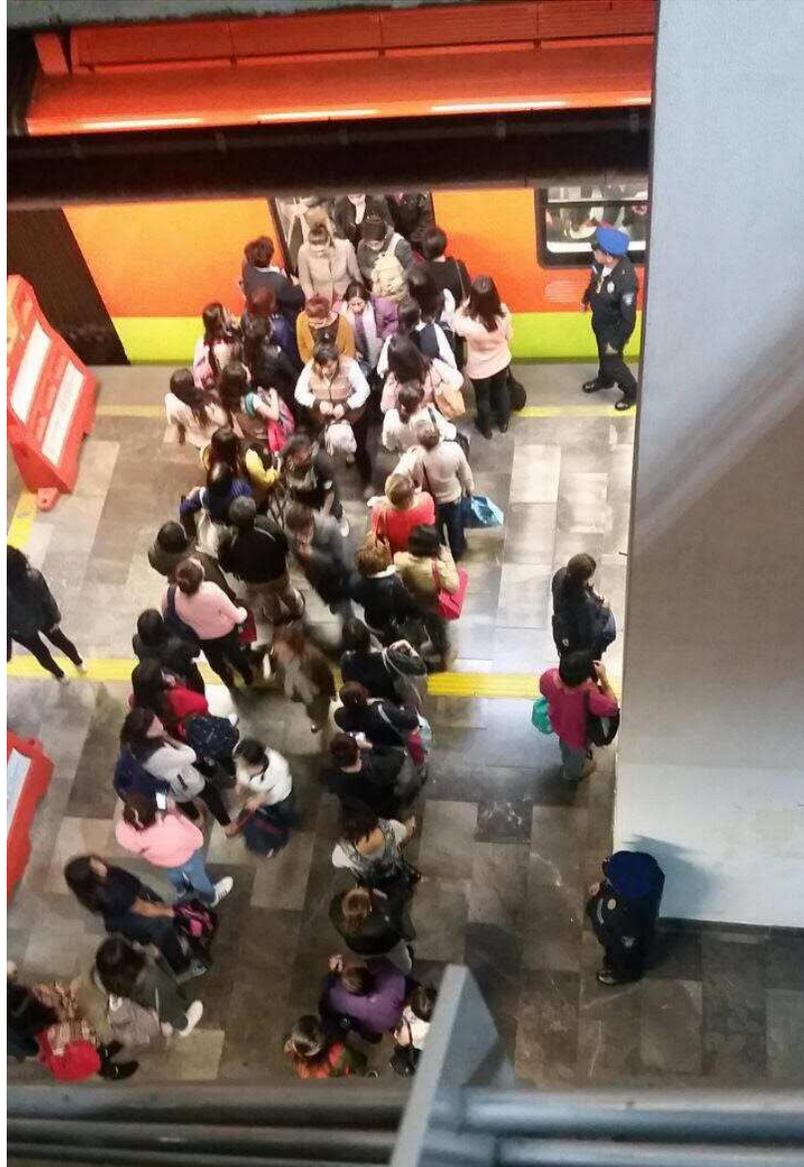


Figura 77: **Estación Zapata de la Línea 12 sin señalamientos.** Se muestran las filas organizadas por usuarios en la sección de niños y mujeres de la estación Zapata de la Línea 12. Las dos filas laterales permiten el libre descenso de los pasajeros, para después subir en dos filas simultáneamente. Posterior a la toma de la fotografía y su difusión en redes sociales, el MXM instaló los señalamientos.

Capítulo 7

Discusión general y conclusiones

En este trabajo de tesis se presentó un estudio sobre sistemas de transporte público (STP) en dos escalas de organización; una global y una local, donde se consideró la dinámica de los trenes y pasajeros respectivamente. Fue pertinente realizar esta diferencia para estudiar los procesos que se desarrollan en cada una de ellas; sin embargo, como se mostró anteriormente, una impacta a la otra y viceversa. Por ejemplo, el mal comportamiento de los pasajeros causa retrasos en la partida del tren, generando un desbalance en el intervalo; de la misma forma, el no contar con un método de regulación de intervalos adecuado, pueden fomentar aglomeraciones importantes en las estaciones, incrementando la probabilidad de tener retrasos. En el diseño de métodos de regulación, se debe tener en cuenta la información que fluye de una escala hacia la otra, si no es de esta manera, se tendrán soluciones parciales. Debe ser evaluado el alcance, las ventajas y desventajas.

Se desarrollaron simulaciones computacionales alimentadas con datos reales del Metro de la Ciudad de México (MXM) con el fin de proponer estrategias de regulación, ya que la experimentación en el sistema real es verdaderamente complicada. La recolección de datos resultó ser una tarea ardua debido a la precisión que requería el trabajo de tesis, se determinó trabajar en escala de tiempo de segundos y conteos de pasajeros de los eventos; se requirió de una gran inversión de tiempo para crear el banco de datos pertenecientes a los videos recolectados. A fin de poder realizar el trabajo de tesis, fue crucial haber participado y ganado dentro de la categoría de Desarrollo de Proyectos del *Primer Premio a*

la *Innovación Tecnológica “Juan Manuel Ramírez Caraza”* organizado por el Sistema de Transporte Colectivo (STC) Metro y el Gobierno de la Ciudad de México. De esta manera, durante el año 2015 se trabajó con el área de Ingeniería de Operación de la Dirección de Transportación del STC para la recolección de videos y datos. Como resultado de la investigación se generó un documento formato tesina de la investigación [35], la cual puede consultarse en la dirección https://github.com/gcarreon/pts-simulator/blob/master/GustavoCarreon_Tesina_Metro.pdf.

7.1. Escala global

Para el desarrollo del simulador de sistemas de transporte público (STP), se utilizó el entorno de modelación basada en agentes (MBA) de NetLogo; se usó el modelo de flujo vehicular *car-following* de Peter Gipps para tener un flujo realista de los trenes; se realizaron tres extensiones para adecuarlo a la MBA: sensor de visión para identificar el tipo de agente y aplicar reglas adecuadas, frenado autónomo con cambio de velocidad deseada y distancia de seguridad. Se construyó la Línea 1 con dimensiones a escala y se modelaron los flujos de pasajeros con datos empíricos. Se realizó una búsqueda exhaustiva en los espacios de parámetros para obtener los valores adecuados en la simulación correspondientes a la dinámica observada empíricamente.

Se abordó al fenómeno de la inestabilidad de los intervalos como la principal causa por la que los STP disminuyen su desempeño [9, 10]. Se presentaron dos modelos para regular los intervalos, el Método General (GM) y el Método Auto-organizante II (SOM-II). Los resultados obtenidos con el GM mostraron una correlación alta con los datos de los intervalos recolectados empíricamente en el MXM; la validación y calibración de los métodos permitieron argumentar que en caso de la implementación del SOM-II se podría obtener una reducción del 20 a 25% en el tiempo de viaje promedio de los pasajeros y una mejora del 25% en los valores de los intervalos.

Se introdujo el parámetro de control λ_p como la media de una distribución Poisson para modelar el arribo de pasajeros al sistema. De esta forma se pudo introducir a la simulación altas afluencias (p.e. $\lambda_p \leq 6$) o bajas afluencias (p.e. $\lambda_p \geq 10$) por estación con el fin de medir el rendimiento de los métodos de regulación.

En el GM, se establecieron cotas mínimas y máximas de espera del tren en la estación y un componente de retraso modelado con una distribución poisson con media λ_r ; con los valores adecuados de los parámetros se logró obtener una correlación alta respecto a mediciones empíricas del MXM. El modelo mostró que el MXM tiene un bajo desempeño debido a una inadecuada regulación de los intervalos y a fluctuaciones importantes en el tiempo de estacionamiento. Los factores que influyeron en la inestabilidad de los intervalos son: la sobresaturación de pasajeros en las estaciones, el cual afectó los tiempos ascenso y descenso, y el tiempo de partida del tren. Para aislar los componentes que promovieron los retrasos y analizar sólo el comportamiento del headway, se exploró un escenario sin retrasos y bajo flujo de pasajeros; por ejemplo, para $\lambda_r = 0$ y $\lambda_p > 10$; como resultado, el tiempo promedio de viaje de los pasajeros mejoró en 10 %; sin embargo, los valores de los intervalos se comportaron de manera inestable, lo que refleja la falta de mecanismos para regular los intervalos.

El sistema regulado con el GM excedió su capacidad cuando $\lambda_p \leq 6$, lo cual representa un flujo alto de pasajeros; como consecuencia, el rendimiento decreció y se formaron cúmulos de trenes. Esta característica se observó en otros modelos [9, 59, 60].

Por otro lado, el SOM-II mostró que mediante el uso de información local y guiado por una dinámica descentralizada fue posible regular los intervalos de manera supraóptima [11]. Se mostró que fue posible recobrar y preservar los valores óptimos de los intervalos bajo cualquier condición inicial de posiciones de los trenes, aún con una configuración de cúmulo. Mostró su capacidad para recuperar y conservar los valores óptimos de los intervalos a través de la modelación de una falla mecánica de un tren. Con valores altos de saturación de pasajeros, por ejemplo, $\lambda_p \leq 6$, el headway permaneció estable y se incrementó la capacidad de transporte del sistema comparado con el GM.

El SOM-II elimina el fenómeno de la inestabilidad del headway, es decir, redujo la formación de cúmulos de trenes (*bus bunching*) en un 100 % y se ajustaron los tiempos de permanencia en estación de manera adaptativa. El SOM-II mejoró el tiempo promedio de viaje de los pasajeros en 18 % para $\lambda_p \leq 7$ sobre el GM; para $\lambda_p = 6$ la mejora fue de 34 %; para $\lambda_p = 5$ fue de 79 %; mientras que para $\lambda_p = 4$ fue de 67 %. La sobresaturación se presentó

cuando $\lambda_p \leq 6$ para el GM y para SOM-II cuando $\lambda_p \leq 4$. El sistema se colapsó con GM cuando $\lambda_p \leq 5$ y con SOM-II cuando $\lambda_p \leq 3$. Estos resultados se pueden comparar con el trabajo presentado en [17] que propone una simulación con aprendizaje en *on-line* para reducir el bus bunching, el cual presenta una reducción en la formación de cúmulos en una tasa del 65 % y una reducción del tiempo en estación de 4.5 %.

Como trabajo futuro, los métodos de regulación pueden ser conjuntados con estrategias de omisión de estaciones (*stop-skipping*) para contribuir a la reducción de sobresaturación en estaciones específicas [16]. Además se puede extender la funcionalidad del simulador, para modelar sistemas completos, es decir, con todas sus líneas y calcular el impacto que tienen las estaciones de transferencia en diferentes condiciones de saturación de pasajeros.

Las simulaciones computacionales son útiles para estudiar los STP ya que tienen los siguientes beneficios: 1. explorar diferentes escenarios; por ejemplo, la simulación de fallas mecánicas de los trenes, el uso de funciones de probabilidad de arribo de los pasajeros, o la implementación de estrategias de dosificación de usuarios con trenes vacíos para transportar a los pasajeros en estaciones sobresaturadas; 2. estimar la estabilidad del headway a partir de las condiciones iniciales con información en tiempo real del sistema; 3. modelar STP completos, por ejemplo, para analizar dinámicas en estaciones de transferencia.

La simulación computacional de los STP que se presentó en este trabajo, en conjunto con los modelos de regulación, tomaron en cuenta los procesos más relevantes de la dinámica: el flujo de trenes y de pasajeros, los tiempos invertidos con el fin de entender el impacto que tendrían los métodos de regulación en el headway y las conjeturas (respaldadas por correlaciones altas) de los posibles beneficios en el sistema real; por otro lado, no se pretendió modelar a detalle todos los procesos que existen en la dinámica de los STP como: cronogramas de despacho de trenes en las terminales, polígonos de carga, infraestructura de las estaciones, etc.

Como producto de este trabajo de tesis se publicaron los resultados de la escala global en la revista internacional PLOS ONE [61], la cual puede consultarse en la dirección <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190100>.

7.2. Escala local

El parámetro λ_r , considerado en el GM representó tres dinámicas observadas en el MXM: 1. el posible retraso en el ascenso y descenso de pasajeros; 2. el retraso en el cierre de puertas causado por la sobresaturación y por conductas inapropiadas de los pasajeros; 3. el retraso en la partida del tren posiblemente por la formación de cúmulos de trenes sobre las vías. En el sistema real, los primeros dos puntos pueden ser tratados con una estrategia adecuada de ascenso y descenso para fomentar conductas más ordenadas entre los pasajeros; mientras que la tercera se puede regular con la implementación del SOM-II.

Se utilizó el modelo de fuerzas sociales o *social force model* junto con la biblioteca PEDSIM (*Pedestrian Crowd Simulation*) para desarrollar un simulador y estudiar la dinámica de los pasajeros en el proceso de ascenso y descenso. Se probaron dos estrategias: “Puertas dedicadas” y “Señalamientos guía en plataforma”; la primera resultó ganadora en el *Primer Premio a la Innovación Tecnológica*; la segunda fue planteada durante la fase de recolección de datos en el MXM, la cual resultó ser la más viable ya que disminuía el tiempo efectivo de ascenso y descenso en 25 %.

Las ideas consideradas en este trabajo y las mediciones empíricas realizadas en el MXM alentaron el desarrollo del estudio piloto en la estación Balderas de la Línea 1 en diciembre de 2016. Como se mencionó a detalle en la sección anterior, los principales resultados de la intervención son: 1. una reducción significativa de empujones, accidentes y fricciones entre los pasajeros; 2. una reducción del tiempo efectivo de ascenso y descenso de un 10 a 15 %; 3. una reducción en las obstrucciones en el proceso de cierre de puertas de 15 a 25 %; y 4. la adopción positiva del esquema por parte de los usuarios.

El surgimiento de las filas fue un resultado inesperado y sorprendente, como consecuencia, se incrementó el orden y se creó una estructura tipo FIFO (*first in, first out*), primero en llegar, primero en salir, la cual mejoró el ascenso y descenso y aportó una reducción en el tiempo total de viaje. La implementación de la estrategia se consideró de bajo costo y alto impacto; actualmente existen 14 estaciones con este esquema, con el que se ven beneficiados poco más de 400,000 pasajeros al día. Se generó un cambio positivo en la cultura de movilidad del pasajero.

7.3. Recomendaciones

Se hacen las siguientes recomendaciones para mejorar los STP:

- Instalación de señalamientos guía en plataforma. Con esta información el usuario puede moverse correctamente sobre la plataforma, puede identificar las áreas de descenso para evitar obstrucciones y buscar posiciones menos saturadas, si así lo desea. Es una estrategia que se está extendiendo a lo largo del mundo; manejan esquemas de ascenso y descenso: Caracas, Río de Janeiro, Dubai, Hong Kong, Singapur, Tokio, Seoul, Beijing, Montreal, Munich, Boston, Ciudad de México, entre otras ciudades.
- Habilitar sistemas de información en tiempo real. Se podría informar el tiempo de espera de los trenes, el cupo disponible o nivel de saturación y en general el estado de las líneas; esto permitiría a los usuarios decidir esperar o probar rutas alternas. Las aplicaciones móviles podrían ayudar a esta tarea; en el MXM es posible implementar servicios de este tipo ya que actualmente se están habilitando servicios de wifi en las líneas.
- Desarrollo de campañas de concientización e información dirigidas a los usuarios y operadores de los STP para promover el correcto uso de los servicios y las implicaciones de un mal comportamiento. También para explicar conceptos básicos de operación, tal como la inestabilidad de los intervalos y el efecto “lento es más rápido” [24].
- Uso y desarrollo de simuladores computacionales para predicciones a corto y largo plazo; se podrían identificar situaciones críticas y prevenir posibles colapsos.
- Diseño de métodos de control para regular los intervalos de los trenes. La implementación del SOM-II es factible ya que podría mejorar de manera significativa el servicio con lo que se incrementaría el umbral de colapso en un 25 %.

7.4. Conclusiones

La distribución del intervalo se consideró como un indicador para medir el desempeño de los STP; es importante que cuenten con un sistema de monitoreo para llevar el registro de los intervalos tanto de manera local como a lo largo del tiempo. El SOM-II mostró que con reglas adecuadas de interacción local fue posible regular los intervalos de manera adaptativa con un desempeño global adecuado. Las variables de los métodos presentados tienen una representación explícita en el fenómeno real, lo que provee una guía para su posible implementación tecnológica y su regulación.

También se considera que la dinámica de los pasajeros debe ser regulada adecuadamente ya que impacta directamente el servicio. El experimento piloto realizado en el MXM mostró que el cambio de interacciones locales entre los pasajeros puede mejorar el sistema considerablemente.

La regulación adecuada de las interacciones locales impactan positivamente la dinámica global, lo que permite mejorar el servicio de manera adaptativa, enfrentar perturbaciones, estabilizar el sistema y reducir retrasos.

Bibliografía

- [1] Cohen JE. Human Population: The Next Half Century. *Science*. 2003;302(5648):1172–1175. doi:10.1126/science.1088665.
- [2] World metro database. Accessed: 2017-06-29;. Available from: <http://mic-ro.com/metro/table.html>.
- [3] Sistema de Transporte Colectivo Metro. Accessed: 2017-07-04;. Available from: <http://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/cifras-de-operacion>.
- [4] Pagels HR. *The Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity*. Bantam Books; 1989.
- [5] Gershenson C, editor. *Complexity: 5 Questions*. Automatic Peess / VIP; 2008. Available from: <http://tinyurl.com/ovg3jn>.
- [6] Gershenson C. The Implications of Interactions for Science and Philosophy. *Foundations of Science*. 2013;18(4):781–790. doi:10.1007/s10699-012-9305-8.
- [7] Louf R, Roth C, Barthelemy M. Scaling in Transportation Networks. *PLOS ONE*. 2014;9(7):1–8. doi:10.1371/journal.pone.0102007.
- [8] Moreira-Matias L, Mendes-Moreira J, de Sousa JF, Gama J. Improving Mass Transit Operations by Using AVL-Based Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2015;16(4):1636–1653. doi:10.1109/TITS.2014.2376772.
- [9] Gershenson C, Pineda LA. Why does public transport not arrive on time? The pervasiveness of equal headway instability. *PLoS ONE*. 2009;4(10):e7292. doi:10.1371/journal.pone.0007292.

- [10] Daganzo CF. A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2009;43(10):913 – 921. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2009.04.002>.
- [11] Gershenson C. Self-organization leads to supraoptimal performance in public transportation systems. *PLoS ONE*. 2011;6(6):e21469. doi:10.1371/journal.pone.0021469.
- [12] Gloor C. PedSim Pedestrian Crowd Simulation; 2015. Available from: <http://pedsim.silmaril.org>.
- [13] Ceder A. *Public Transit Planning and Operation*. Taylor & Francis; 2007. Available from: <https://books.google.com.mx/books?id=QucV7bDg9N4C>.
- [14] Welding PI. The Instability of a Close-Interval Service. *OR*. 1957;8(3):133–142.
- [15] Bartholdi JJ, Eisenstein DD. A self-coördinating bus route to resist bus bunching. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2012;46(4):481 – 491. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2011.11.001>.
- [16] Liu Z, Yan Y, Qu X, Zhang Y. Bus stop-skipping scheme with random travel time. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013;35(Supplement C):46 – 56. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.06.004>.
- [17] Moreira-Matias L, Cats O, Gama J, Mendes-Moreira J, de Sousa JF. An online learning approach to eliminate Bus Bunching in real-time. *Applied Soft Computing*. 2016;47(Supplement C):460 – 482. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.06.031>.
- [18] Yu H, Wu Z, Chen D, Ma X. Probabilistic Prediction of Bus Headway Using Relevance Vector Machine Regression. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017;18(7):1772–1781. doi:10.1109/TITS.2016.2620483.
- [19] Yu H, Chen D, Wu Z, Ma X, Wang Y. Headway-based bus bunching prediction using transit smart card data. *Transportation*

- Research Part C: Emerging Technologies. 2016;72(Supplement C):45 – 59. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.09.007>.
- [20] Li Y, Wang X, Sun S, Ma X, Lu G. Forecasting short-term subway passenger flow under special events scenarios using multiscale radial basis function networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017;77(Supplement C):306 – 328. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.02.005>.
- [21] Liang S, Zhao S, Lu C, Ma M. A self-adaptive method to equalize headways: Numerical analysis and comparison. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2016;87:33 – 43. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2016.02.008>.
- [22] Daganzo CF, Pilachowski J. Reducing bunching with bus-to-bus cooperation. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2011;45(1):267 – 277. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2010.06.005>.
- [23] Andres M, Nair R. A predictive-control framework to address bus bunching. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017;104:123 – 148. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2017.06.013>.
- [24] Gershenson C, Helbing D. When slower is faster. *Complexity*. 2015;21(2):9–15. doi:10.1002/cplx.21736.
- [25] Bonabeau E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2002;99(Suppl 3):7280–7287. doi:10.1073/pnas.082080899.
- [26] Wilensky U. NetLogo; 1999. Available from: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>.
- [27] Gipps PG. A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1981;15(2):105 – 111. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(81\)90037-0](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(81)90037-0).
- [28] Spyropoulou I. SIMULATION USING GIPPS' CAR-FOLLOWING MODEL—AN IN-DEPTH ANALYSIS. *Transportmetrica*. 2007;3(3):231–245. doi:10.1080/18128600708685675.

- [29] STC. Sistema de Transporte Colectivo Metro. Análisis sobre diversas alternativas que modifican el sistema actual de ascenso y descenso en los trenes;Reporte técnico (interno).
- [30] Helbing D. A fluid dynamic model for the movement of pedestrians. arXiv preprint cond-mat/9805213. 1998;.
- [31] Helbing D, Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*. 1995;51(5):4282.
- [32] Helbing D, Buzna L, Johansson A, Werner T. Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation science*. 2005;39(1):1–24.
- [33] Zhang Q, Han B, Li D. Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2008;16(5):635 – 649. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2007.12.001.
- [34] Lee JYS, Lam WHK, Wong SC. Pedestrian simulation model for Hong Kong underground stations. In: *ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585)*; 2001. p. 554–558.
- [35] Carreón G, Zapotecatl J, Gershenson C, Pineda LA. Ascenso y descenso eficiente en vagones. *Sistema de Transporte Colectivo; Universidad Nacional Autónoma de México*; 2016.
- [36] Janson Olstam J, Tapani A. Comparison of car-following models. *Swedish National Road and Transport Research Institute*; 2004. 960A.
- [37] Wilson R. An analysis of Gipp’s car-following model of highway traffic. *IMA Journal of Applied Mathematics*. 2001;66 (5):509 – 537. doi:10.1093/imamat/66.5.509.
- [38] Ciuffo B, Punzo V, Montanino M. Thirty Years of Gipps’ Car-Following Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2012;2315:89–99. doi:10.3141/2315-10.
- [39] RANJITKAR P, NAKATSUJI T, KAWAMUA A. CAR-FOLLOWING MODELS: AN EXPERIMENT BASED BENCHMARKING. *Journal of*

- the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2005;6:1582–1596. doi:10.11175/easts.6.1582.
- [40] Ciuffo B, Punzo V, Torrieri V. Comparison of Simulation-Based and Model-Based Calibrations of Traffic-Flow Microsimulation Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2008;2088:36–44. doi:10.3141/2088-05.
- [41] Vasconcelos L, Neto L, Santos S, Silva AB, Seco Á. Calibration of the Gipps Car-following Model Using Trajectory Data. *Transportation Research Procedia*. 2014;3:952 – 961. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.075.
- [42] Sistema de Transporte Colectivo Metro. Características generales del material rodante. Accessed: 2017-08-28;. Available from: <http://data.metro.cdmx.gob.mx/operacion/caractecnicas.html>.
- [43] Ilachinski A, Zane. *Cellular Automata: A Discrete Universe*. River Edge, NJ, USA: World Scientific Publishing Co., Inc.; 2001.
- [44] *A New Kind of Science*. Champaign, Illinois, US, United States: Wolfram Media Inc.; 2002.
- [45] Theraulaz G, Bonbeau E. A Brief History of Stigmergy. *Artif Life*. 1999;5(2):97–116. doi:10.1162/106454699568700.
- [46] Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. New York: Oxford University Press; 1999.
- [47] Lin Tm, Wilson NH. Dwell time relationships for light rail systems. *Transportation Research Record*. 1992;(1361):287–295.
- [48] Fayyaz SK, Liu XC, Porter RJ. Genetic Algorithm and Regression-Based Model for Analyzing Fare Payment Structure and Transit Dwell Time. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2016;2595:1–10. doi:10.3141/2595-01.
- [49] Milkovits M. Modeling the Factors Affecting Bus Stop Dwell Time: Use of Automatic Passenger Counting, Automatic Fare Counting, and Automatic Vehicle Location Data. *Transportation Research Record*:

- Journal of the Transportation Research Board. 2008;2072:125–130. doi:10.3141/2072-13.
- [50] Neumann A, Nagel K. Avoiding bus bunching from spreading: A dynamic approach using a multi-agent simulation framework. 2010;.
- [51] An Agent Based Model for the Simulation of Road Traffic and Transport Demand in A Sydney Metropolitan Area; 2014. Available from: http://agents.fel.cvut.cz/att2014/att2014_paper_8.pdf.
- [52] Kickhöfer B, Kaddoura I, Neumann A, Tirachini A. Optimal public transport supply in an agent-based model: The influence of departure time choice on operator's profit and social welfare. 2012;.
- [53] Woolridge M, Wooldridge MJ. Introduction to Multiagent Systems. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2001.
- [54] Ferber J. Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. 1st ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.; 1999.
- [55] Helbing D. Traffic modeling by means of physical concepts. In: D E Wolf AB M Schreckenberg, editor. Traffic and Granular Flow. Singapore: World Scientific; 1996. p. 87–104.
- [56] Helbing D. Verkehrsdynamik[Traffic dynamics]. Berlin: Springer; 1997.
- [57] Helbing D, Farkas IJ, Vicsek T. Freezing by Heating in a Driven Mesoscopic System. Phys Rev Lett. 2000;84:1240–1243. doi:10.1103/PhysRevLett.84.1240.
- [58] ISA TV;. Available from: <http://isa.com.mx/publicidad-en-metro/metro-de-la-ciudad-de-mexico/>.
- [59] Nagatani T. Fluctuation of tour time induced by interactions between cyclic trams. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2004;331(1):279 – 290. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2003.07.007>.
- [60] O'Loan OJ, Evans MR, Cates ME. Jamming transition in a homogeneous one-dimensional system: The bus route model. Phys Rev E. 1998;58:1404–1418. doi:10.1103/PhysRevE.58.1404.

- [61] Carreón G, Gershenson C, Pineda LA. Improving public transportation systems with self-organization: A headway-based model and regulation of passenger alighting and boarding. PLOS ONE. 2017;12(12):1–20. doi:10.1371/journal.pone.0190100.

