



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO  
Posgrado en Ciencia e  
Ingeniería de la Computación



**Primer premio a la innovación tecnológica “Ing. Juan Manuel Ramírez Caraza” y Concurso de apoyos para el desarrollo de proyectos con aplicación al Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México 2014.**

### **Reporte del proyecto de investigación**

### **“Ascenso y descenso eficiente en vagones”**

### **Integrantes**

**Mtro. Gustavo Carreón Vázquez**

**Mtro. Jorge Luis Zapotecatl López**

**Dr. Carlos Gershenson García**

**Dr. Luis Alberto Pineda Cortés**

**Ciudad de México**

**Febrero, 2016**



Este reporte presenta el desarrollo y los resultados del proyecto de investigación “Ascenso y descenso eficiente en vagones” realizado dentro del 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.

En virtud de que el proyecto fue ganador dentro de la categoría de desarrollo de proyectos se trabajo conjuntamente con el Área de Transportación de la Línea 1 del Sistema de Transporte Colectivo Metro, en el periodo de diciembre de 2014 a septiembre de 2015.

En este reporte se describe la propuesta metodológica para realizar un estudio general de una Línea de Metro del Sistema de Transporte Colectivo y los resultados del estudio de campo y análisis de los datos para generar métodos de regulación de pasajeros en el proceso de ascenso y descenso en vagones.



## Agradecimientos

Agradecemos todo el apoyo brindado por el Ing. Ernesto Lira, tutor del proyecto y Coordinador del Área de Transportación de la Línea 1 del Metro de la Ciudad de México y al personal a su cargo, Ing. Guadalupe Díaz López, Ing. Dennisse Velázquez Piña, Luis Felipe López Castellanos, Jorge Flores García, Lic. Arturo Ignacio Solís Luna, Enrique Muñoz Alanís, y en general a todo el personal del área, quienes nos orientaron, ayudaron y dieron soporte en la realización de la investigación a toda hora y todo momento.

De la misma manera, agradecemos el apoyo y el seguimiento del proyecto al Dr. José Ángel Bermejo y al Ing. José Antonio Barajas, coordinadores del *Primer premio a la innovación tecnológica “Ing. Juan Manuel Ramírez Caraza”*

A nuestros tutores del Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación de la UNAM, el Dr. Carlos Gershenson García y al Dr. Luis A. Pineda Cortés por sus observaciones y apoyo a lo largo del proyecto.

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

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Obtención y procesamiento de información a través de videograbaciones .....</b>	<b>7</b>
1.1 Línea 1 del Metro de la Ciudad de México.....	8
1.2 Horarios de grabación .....	9
1.3 Grabación de carreras completas .....	10
1.4 Almacenamiento y edición de los videos.....	14
1.5 Caracterización del recorrido .....	14
1.6 Tablas características de los viajes.....	17
<b>2. Indicadores globales de rendimiento de la línea del Metro.....</b>	<b>23</b>
2.1 Frecuencia de intervalos de paso (headway).....	24
2.2 Proporciones de tiempo de viaje .....	25
2.3 Tiempos absolutos de viaje .....	27
2.4 Retrasos en tiempos de viaje .....	28
2.5 Velocidades promedio por estación .....	29
2.6 Distribuciones de probabilidad en horarios específicos.....	33
<b>3. Patrones de comportamiento de los pasajeros .....</b>	<b>43</b>
3.1 Evasión.....	44
3.2 Campo de visión.....	46
3.3 Zonas preferenciales. ....	47
3.4 Modelo de vectores de preferencias.....	48
3.5 Caso específico .....	53

<b>4. Ascenso y descenso de pasajeros en vagones .....</b>	<b>55</b>
4.1 Casos de densidades en el proceso de ascenso-descenso.....	57
4.2 Análisis de la formación de flujos en el proceso de ascenso-descenso .....	59
4.3. Análisis de casos específicos. ....	60
Caso 3. Saturación alta de vagón, saturación alta de la plataforma con ascensos y descensos grandes .....	60
Caso 10. Saturación baja de vagón y alta de plataforma con ascensos grandes .....	64
Caso 16. Saturación baja de vagón y baja de plataforma con ascensos-descensos bajos. ....	66
<b>5. Indicadores del proceso de ascenso y descenso de pasajeros ....</b>	<b>69</b>
5.1 Conteo de ascensos y descensos .....	70
5.2 Tiempo de puertas abiertas. ....	73
5.3 Tiempo efectivo ascenso-descenso .....	78
5.4 Tiempo de puertas abiertas vs tiempo efectivo de ascenso-descenso	87
<b>6. Propuesta de regulación para el proceso de ascenso y descenso de pasajeros .....</b>	<b>91</b>
6.1 Simulación computacional. <i>Modelo de fuerzas sociales</i> .....	92
6.2 Estado actual del proceso de ascenso-descenso. ....	93
6.3 Estrategia “Regulación de intervalos de tiempo de puertas abiertas”	97
6.4 Estrategia. “Señalamientos guía en plataforma para ascenso y descenso” .....	100
Caso 1. La formación de un flujo central para bajar y dos laterales para subir.....	101
Caso 2 y 3. Formación de un flujo para subir y uno para bajar .....	102
Caso 4. Formación de un flujo único para subir o para bajar .....	102
Requerimientos .....	103
Detalles de la simulación computacional.....	104
6.5 Propuestas de diseño para la señalización de “Líneas guía en plataforma”.....	110
6.6 Estrategia. “Puertas dedicadas de ascenso y descenso.” .....	114
6.7 Comparación de estrategias .....	119
<b>Conclusiones .....</b>	<b>123</b>

<b>Bibliografía .....</b>	<b>127</b>
<b>Anexo 1. Manual del Simulador del Sistema de Transporte Colectivo Metro .....</b>	<b>129</b>
<b>Anexo 2. Modelo de Fuerzas Sociales.....</b>	<b>151</b>
<b>Anexo 3. Cálculo de las rutas más cortas.....</b>	<b>155</b>



# Introducción

En la actualidad más de la mitad de la población mundial vive en las grandes urbes [1]. Los Sistemas de Transporte Públicos (STP) desempeñan un papel fundamental porque permiten la movilidad de grandes flujos de personas. Existen 195 sistemas de metro en el mundo usados diariamente por más de 112 millones de usuarios [2].

En la Ciudad de México, el Sistema de Transporte Colectivo (STC) está compuesto por 12 líneas con 195 estaciones. Con 180 km de infraestructura se encuentra dentro de las primeras 13 más grandes del mundo [2]. En el año 2014 se brindó servicio a casi 1.6 miles de millones de usuarios y el número de usuarios se incrementa anualmente [3].

Uno de los principales retos en las grandes ciudades es que los STP tengan un desempeño eficiente, para lograr esto hay que considerar los factores más importantes que van desde el correcto funcionamiento de la infraestructura, la correcta configuración de los sistemas de monitoreo y control, hasta la regulación y dosificación de flujos de pasajeros. Ubicar los elementos constitutivos del sistema y como se relacionan con los demás nos permitirán controlarlos y ajustarlos considerando las capacidades y sobrecargas actuales del sistema.

Una de las principales medidas que permiten evaluar el desempeño del transporte público es la capacidad con la que transportan a los usuarios considerando las afluencias locales, totales y los tiempos de viaje promedio.

## Introducción

Es de suma importancia conocer el comportamiento general del flujo de usuarios para responder a preguntas como las siguientes, ¿cómo se relaciona esta afluencia con los horarios del día?, ¿qué impacto tiene la afluencia de pasajeros en estaciones específicas a lo largo de la línea?, ¿cómo son los patrones de viaje de los usuarios?, ¿cuáles son las estrategias adecuadas para organizar los flujos de los pasajeros en las estaciones?, ¿cuáles son los tiempos óptimos de espera de los trenes en las estaciones en función de la afluencia?, ¿cuánto tiempo invierten los pasajeros en los procesos de ascenso y descenso?, etc.

En la década de los ochentas aproximadamente se realizó un estudio en el STC para probar distintos métodos de regulación de pasajeros considerando puertas con funciones exclusivas de entrada y de salida [4]. Se realizaron experimentos con personas reclutadas recreando escenarios reales para analizar el comportamiento de los pasajeros.

En la actualidad se han propuesto modelos y simulaciones computacionales para modelar el flujo de peatones [5], [6], [7] los procesos de ascenso y descenso con autómatas celulares [8], y el flujo de peatones en estaciones de sistemas de transporte públicos [9].

En este proyecto de investigación se pretende responder las preguntas antes mencionadas y generar propuestas de regulación a través de un estudio y análisis de la Línea 1 desde un enfoque sistémico utilizando simulaciones computacionales para representar posibles escenarios y probar los diversos métodos de regulación.

El objetivo general del proyecto es proponer una estrategia que permita regular y reducir los tiempos de ascenso y descenso de pasajeros en el Sistema de Transporte Colectivo Metro de manera viable. Como objetivos específicos se analizarán y cuantificarán los tiempos de espera, de ascenso y descensos de pasajeros; se diseñarán estrategias adecuadas de regulación de pasajeros en el proceso de ascenso y descenso y se realizará una comparación con la dinámica actual. Por último se definirá un modelo computacional para simular posibles escenarios con diferentes estrategias de regulación de pasajeros instanciado con datos reales.

Para cumplir con nuestros objetivos se definió y ajustó una metodología para la obtención de datos y su procesamiento, se identificaron las variables

más representativas del sistema para encontrar patrones y cambios en los régímenes de comportamiento. Aunque el proyecto se centra en el proceso de ascenso y descenso de pasajeros, fue indispensable hacer un estudio general para entender qué es lo que sucede en las líneas.

Específicamente para la obtención de datos se realizaron un conjunto de videogramaciones para rescatar las propiedades fundamentales y entender la dinámica del sistema. El proceso de estudio se ha desarrollado tomando muestras del desempeño en intervalos de tiempo específicos, en los cuales se recaba la mayor información posible considerando trayectos de los trenes en horarios representativos.

La información recabada fue organizada en dos clases, información de *carácter global* e información de *carácter local*. La información de *carácter global* son las medidas promedio del sistema, es decir, los tiempos promedio generales de la Línea, como el tiempo total de viaje, proporciones de tiempo estación e interestación, velocidades promedio de los trenes, afluencia de pasajeros promedio de la línea, etc.; la información de *carácter local* son los datos puntuales que se obtienen en las estaciones, como son, procesos de intercambio de pasajeros en las estaciones, el *tiempo efectivo de ascenso y descenso*, el conteo de pasajeros al subir y bajar del vagón, el tiempo de puertas abiertas, los tiempos de permanencia del tren en la estación, retrasos de apertura de puertas, etc.

Cada tipo de información, ya sea local o global, contiene indicadores del rendimiento y desempeño de la línea, los cuales son útiles para realizar comparaciones en cada nivel de organización del sistema y analizar cómo se relacionan entre ellas. Es indudable que los efectos o perturbaciones locales impactan directamente el rendimiento de los indicadores globales, principalmente por la sobresaturación del sistema, por tal motivo es de suma importancia tratar de regular y organizar los componentes de manera local.

Los beneficios y alcances de la investigación son prometedores, es un estudio innovador que proporcionará información precisa sobre el proceso de ascenso y descenso de pasajeros a través del análisis de videogramaciones y del planteamiento de una medida que caracterice adecuadamente el proceso de ascenso y descenso, llamada *tiempo efectivo de ascenso-descenso*.

## Introducción

Con la información que proporcionen los estudios de campo y con la implementación y análisis de las simulaciones computacionales se recabarán los elementos necesarios para fundamentar la adopción de nuevos esquemas de ascenso y descenso más eficientes, de bajo costo y alto impacto, que promuevan el flujo de los trenes reduciendo los tiempos promedio de viaje y elevando la calidad del viaje de los usuarios.

En el Capítulo 1 se muestra parte de la metodología para realizar las grabaciones en el metro, la definición de las tablas de variables utilizadas y la caracterización del viaje.

En el Capítulo 2 se plantea a partir del procesamiento de los datos de las videogramas una serie de medidas para describir el rendimiento de la línea de manera global. Se muestra un análisis con los principales indicadores construyendo gráficas con valores promedio para cuantificar y comparar diversos estados del sistema.

En el Capítulo 3 se describe el comportamiento de los pasajeros en el interior del vagón a través de reglas básicas locales, la preferencia de los pasajeros por ciertos lugares, y la descripción de dinámicas promedio y ejemplos de sucesos aislados.

En el Capítulo 4 se hace un análisis de los posibles casos que pueden ocurrir en el proceso de ascenso y descenso considerando diferentes afluencias de pasajeros, se muestra la existencia y la formación de flujos como una estrategia para disminuir la fricción entre ellos.

En el Capítulo 5 se propone un conjunto de indicadores para describir el rendimiento en el proceso de ascenso y descenso (de carácter local), se plantea el *tiempo efectivo de ascenso-descenso* como una medida exacta para describir este proceso.

En el Capítulo 6 se proponen los métodos de regulación de pasajeros para el proceso de ascenso y descenso; por medio de simulaciones computacionales y utilizando el modelo de fuerzas sociales de Dirk Helbing se recrean posibles escenarios, se hace una comparación con distintas estrategias y con datos reales.

## Introducción

Se anexa el manual de operación del simulador computacional realizado para la investigación, así como, la definición y explicación del modelo de fuerzas sociales y de algoritmos de búsqueda de trayectorias.

## Introducción

# **Capítulo 1**

## **Obtención y procesamiento de información a través de videogramaciones**

La manera más eficiente para obtener información y datos de las Líneas del Metro es a través de videogramaciones<sup>1</sup>. Cuando se analizan sistemas con un gran número de componentes, en este caso, con un gran número de pasajeros y donde los tiempos de desarrollo de los procesos son pequeños, por ejemplo, de 20 a 60 segundos en procesos de ascenso-descenso, las videogramaciones son adecuadas ya que se pueden repetir los eventos una y otra vez a velocidades de reproducción de cuadro por cuadro para realizar los análisis.

Para recabar la información se propusieron dos métodos, el primero, de forma local, donde se graba en la plataforma de estaciones particulares durante un periodo de tiempo, y el segundo, de manera global, donde se graban carreras completas en el interior de los vagones para tener una

---

<sup>1</sup> Existen muchas fuentes de información para realizar análisis de las Líneas del metro de la Ciudad de México, como cuadros estadísticos, conteos parciales y generales, etc.; sin embargo, el grado de detalle del análisis requirió de la grabación interna de los vagones de viajes completos y de grabaciones en plataforma en estaciones específicas para tener una muestra de la dinámica del sistema durante intervalos de tiempo.

## Capítulo 1

muestra de la dinámica de toda la línea en un horario particular. Ambas aportan mucha información; el enfoque global permite rastrear la dinámica interna del vagón a lo largo de viaje, mientras que el enfoque local permite estudiar el comportamiento de los pasajeros en las estaciones, en particular el proceso de ascenso y descenso.

### 1.1 Línea 1 del Metro de la Ciudad de México

El estudio se realizó en la Línea 1 del Metro de la Ciudad de México, la primera línea que se construyó en el Sistema de Transporte Colectivo, tiene una longitud de 18.828 Km y está integrada por 20 estaciones (ver Figura 1.1), de las cuales 7 son de correspondencia con otras líneas. La afluencia de la Línea 1 en 2014 fue de 263.7 millones de pasajeros. [6].

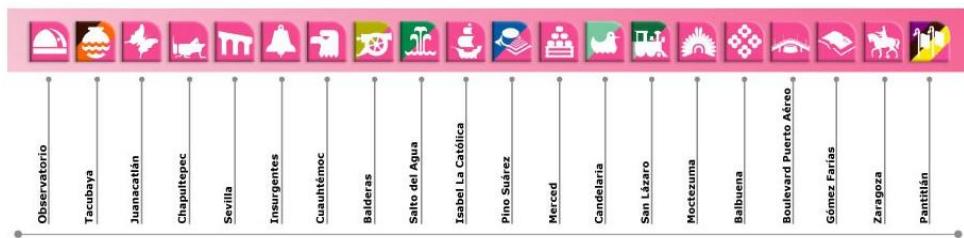


Figura 1.1. Estaciones de la Línea 1 y su iconografía.

Geográficamente corta transversalmente al Distrito Federal conectando las zonas del oriente con el poniente. Con esta distribución la mayor afluencia de pasajeros, por la mañana, es de la dirección Pantitlán a Observatorio y en las noches es lo contrario, de Observatorio a Pantitlán. En la Figura 1.2 se muestra un plano de la Ciudad de México y la Línea 1 del Metro hecho con *Google Maps*.

## Obtención y procesamiento de información

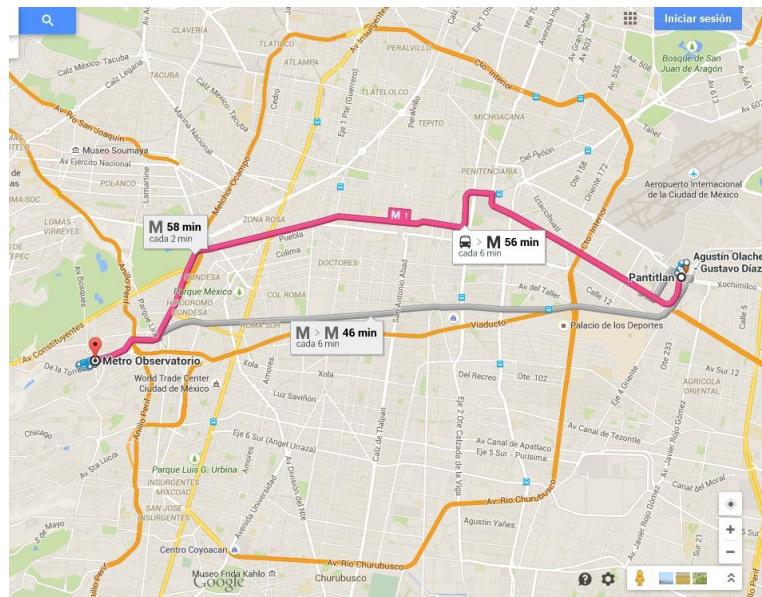


Figura 1.2. Ubicación de la Línea 1 con Google Maps.

## 1.2 Horarios de grabación

Es importante definir los horarios en los que se desarrollarán las grabaciones debido a que la dinámica de la línea cambia en función de la afluencia de pasajeros y sus patrones de viaje. Se busca principalmente estudiar la línea cuando hay grandes saturaciones ya que el objetivo principal es definir estrategias y métodos de regulación para hacer más eficiente el servicio. Las muestras repetitivas en horarios específicos permiten obtener el rendimiento promedio de la línea. Se debe considerar las horas pico cuando hay saturación de pasajeros y también en horarios normales cuando hay poca saturación, de esta manera podemos comparar los videos y observar diferencias y semejanzas en la dinámica.

La afluencia de pasajeros en los sistemas de transporte públicos presentan ciertas regularidades a lo largo del día, esto se debe principalmente a los horarios laborales de la gente. Por ejemplo, las líneas del Metro de la Ciudad de México presentan gran saturación por las mañanas de 7:00 a 9:30

## Capítulo 1

am, y por la noche de 7:30 a 9:30 pm. Cada línea presenta cierto perfil de afluencia que está caracterizada por la posición geográfica.

Las videogramas fueron realizadas principalmente en las horas consideradas de mayor afluencia u horas pico para las dos direcciones.

### 1.3 Grabación de carreras completas

Para el método de grabación global se grabaron carreras completas. Se le llama carrera al viaje realizado de terminal a terminal en las líneas del metro de la Ciudad de México. También se consideró grabar en el vagón identificado como *PR* ya que es exactamente el vagón central del tren, en la mayoría de los casos coincide con las entradas principales de las estaciones y es donde se presenta más actividad de usuarios a diferencia de otras zonas. Las cámaras se fijaron en los extremos del vagón con cinta adhesiva de doble contacto, de esta manera permanecieron estables a lo largo de la grabación, teniendo la ventaja de colocarlas y quitarlas fácilmente en otros trenes, se probó con bastones pero resultaron poco convenientes ya que el movimiento del tren mismo hizo inestable la grabación.

Se adquirieron dos cámaras de la marca GoPro Hero Silver Edition con memoria de 64 GB las cuales tienen batería para grabar alrededor de 2:00 horas en alta definición de forma continua, esto permitió considerar la grabación de viajes completos de terminal a terminal.

El alcance de la cámara de video es parcial en el vagón (Figura 1.3), ya que solo se puede grabar a detalle en las zonas de instalación, en este caso “A” y “D”. Se propone que en un estudio posterior y para tener mayor precisión de los datos se podrían adquirir 2 cámaras más para fijarlas en las zonas “B” y “C”. La Línea 1 tiene una ventaja para realizar esto ya que la apertura de puertas siempre las realiza del mismo lado, por consiguiente se podrían fijar del lado contrario para tener cubierta la zona. Con las cuatro cámaras instaladas se tendría la oportunidad de analizar el comportamiento detallado de los pasajeros y los movimientos que realizan en las zonas y los desplazamientos entre una zona y otra.

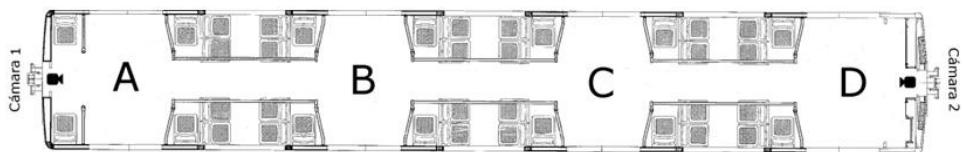


Figura 1.3. El vagón para su análisis se divide en cuatro zonas “A”, “B”, “C” y “D”. La zona “A” y “D” son los extremos del vagón y las zonas “B” y “C” son las partes intermedias, cada zona contiene una región de puertas y el conjunto de asientos correspondientes. Las cámaras se fijaron en cada extremo del vagón.

En las Imágenes 1.1 y 1.2 se muestra el interior del vagón en la grabación de una carrera en la Línea 1 del Metro dirección Observatorio – Pantitlán iniciada a las 19:18 pm.



Imagen 1.1. Grabación del interior del vagón en la Línea 1 del Metro de la Ciudad de México.



Imagen 1.2. Ascenso y descenso de pasajeros grabado desde el interior del vagón.



Imagen 1.3 Grabación en plataforma en la estación Pino Suárez de la Línea 1 del Metro.



Imagen 1.4 Ascenso y descenso grabado desde la plataforma de la estación Pino Suárez.

## Capítulo 1

En la Tabla 1.1 se muestra el esquema de grabación considerando los días, horarios, tiempos de grabación y las características o detalles de la grabación.

Grabaciones Línea 1. Periodo: Febrero 3 - Marzo 3, 2015					
ID	Fecha	Hora de inicio	Trayecto	Tiempo grabación (min)	Archivo Formato
1	03/02/2015	01:37 p.m.	Pantitlán - Salto del Agua	00:17:45	248,111
2	03/02/2015	01:55 p.m.	Plataforma Balderas	00:17:45	248,105
3	09/02/2015	08:00 a.m.	Pantitlán - Observatorio	00:38:23	496,839
4	09/02/2015	10:00 a.m.	Observatorio - Pantitlán	00:09:22	121,109
5	09/02/2015	09:07 a.m.	Observatorio - Pantitlán	00:06:45	87,319
6	09/02/2015	08:30 a.m.	Pantitlán - Observatorio	00:44:48	579,928
7	09/02/2015	10:25 a.m.	Observatorio - Salto del Agua	00:04:27	57,772
8	09/02/2015	08:26 a.m.	Pantitlán - Observatorio	00:15:23	214,931
9	09/02/2015	09:09 a.m.	Observatorio - Pantitlán	00:09:32	133,258
10	09/02/2015	09:44 a.m.	Pantitlán - Salto del Agua	00:46:32	651,041
11	10/02/2015	06:30 p.m.	Observatorio - Pantitlán	00:43:02	556,963
12	10/02/2015	07:20 p.m.	Pantitlán - Observatorio	00:16:34	214,239
13	10/02/2015	06:35 p.m.	Observatorio - Pantitlán	00:43:04	602,481
14	10/02/2015	07:25 p.m.	Pantitlán - Observatorio	00:36:23	509,091
15	16/02/2015	07:59 a.m.	Pantitlán - Observatorio	00:41:58	543,102
16	16/02/2015	08:47 a.m.	Plataforma Observatorio	00:00:31	6,672
17	16/02/2015	08:51 a.m.	Observatorio - Pantitlán	00:31:43	410,392
18	16/02/2015	09:26 a.m.	Observatorio - Salto del Agua	00:25:58	336,014
19	16/02/2015	09:52 a.m.	Salto del Agua Plataforma	00:29:09	377,134
20	16/02/2015	08:05 a.m.	Pantitlán - Observatorio	00:36:29	472,251
21	16/02/2015	08:47 a.m.	Observatorio Plataforma	00:00:37	8,124
22	16/02/2015	08:51 a.m.	Observatorio - Pantitlán	00:31:59	413,854
23	16/02/2015	09:28 a.m.	Pantitlán - Salto del Agua	00:10:44	138,793
24	17/02/2015	06:40 p.m.	Observatorio - Pantitlán	00:48:27	627,039
25	17/02/2015	07:32 p.m.	Pantitlán - Observatorio	00:33:45	436,677
26	17/02/2015	08:16 p.m.	Observatorio - Pantitlán	00:21:40	280,187

## Obtención y procesamiento de información

27	17/02/2015	08:40 p.m.	Salto del Agua Plataforma	00:00:13	2,944
28	17/02/2015	06:40 p.m.	Observatorio - Pantitlán	00:48:32	628,161
29	17/02/2015	07:32 p.m.	Pantitlán - Observatorio	00:34:06	441,245
30	17/02/2015	08:16 p.m.	Observatorio - Salto del Agua	00:22:22	289,458
31	17/02/2015	08:38 p.m.	Salto del Agua Plataforma	00:15:08	195,619
32	23/02/2015	08:07 a.m.	Pantitlán - Observatorio	00:47:37	663,330
33	23/02/2015	09:04 a.m.	Observatorio - Pantitlán	00:29:49	417,038
34	23/02/2015	09:44 a.m.	Pantitlán - Chapultepec	00:29:58	387,645
35	23/02/2015	08:07 a.m.	Pantitlán - Observatorio	00:47:50	619,112
36	23/02/2015	09:02 a.m.	Observatorio - Pantitlán	00:32:42	423,132
37	23/02/2015	09:44 a.m.	Pantitlán - Chapultepec	00:07:45	100,050
38	24/02/2015	07:19 p.m.	Observatorio - Pantitlán	00:49:39	694,578
39	24/02/2015	08:20 p.m.	Pantitlán - Observatorio	00:32:07	445,688
40	24/02/2015	08:55 p.m.	Observatorio - Isabel La Católica.	00:14:14	170,654
41	24/02/2015	07:13 p.m.	Observatorio - Pantitlán	00:49:45	695,999
42	24/02/2015	08:20 p.m.	Pantitlán - Observatorio	00:32:21	351,646
43	24/02/2015	08:55 p.m.	Observatorio - Pantitlán	00:34:18	413,286
44	24/02/2015	09:33 p.m.	Pantitlán - Salto del Agua	00:18:07	218,162
45	02/03/2015	08:56 a.m.	Pantitlán - Observatorio	01:32:21	1,059,526
46	02/03/2015	10:36 a.m.	Observatorio - Salto del Agua	00:12:33	151,076
47	02/03/2015	08:56 a.m.	Pantitlán - Observatorio	01:33:51	1,132,931
48	02/03/2015	10:37 a.m.	Observatorio - Salto del Agua	00:12:21	148,873
49	03/03/2015	07:18 p.m.	Observatorio - Pantitlán	01:18:15	717,211
50	03/03/2015	08:41 p.m.	Pantitlán - Observatorio	00:30:23	328,481
51	03/03/2015	09:21 p.m.	Observatorio - Pantitlán	00:33:19	382,061
52	03/03/2015	09:56 p.m.	Pantitlán - Salto del Agua	00:17:19	143,957
53	03/03/2015	07:18 p.m.	Observatorio - Pantitlán	01:18:29	643,502
54	03/03/2015	08:41 p.m.	Pantitlán - Observatorio	00:30:36	285,039
<b>Total</b>				<b>28:08:45</b>	<b>20,921,830</b>

Tabla 1.1. Videograbaciones con las características principales de cada archivo en formato AVI.

## 1.4 Almacenamiento y edición de los videos

Para el almacenamiento de los videos se contó con un disco duro ya que los volúmenes de información son altos, en nuestro caso se generó alrededor de 200 GB con 54 videos de alta definición y 21 GB con los mismos videos en formato AVI con una resolución menor. Para el análisis se usaron los videos en resolución baja y se crearon copias en discos DVD para los integrantes del equipo.

Adicionalmente se creó una cuenta en Dropbox para compartir la información vía internet con los integrantes del equipo y se montaron en línea para su consulta en la siguiente dirección:

<https://www.dropbox.com/sh/epyesh3pbiceqmh/AACeltPzO3xu6CqASGEEnfNKBa?dl=0>

Para el análisis de los videos se recomienda que se utilice un software adecuado ya que, en algunas ocasiones, es necesario cambiar de formatos, modificar la calidad del video, segmentarlo, unirlo, etc. En nuestro caso usamos el software *Freemake Video Converter* para recorrer los videos cuadro por cuadro, se uso la versión libre de pago. Se puede bajar de la dirección web <http://www.freemake.com/es/downloads/>.

## 1.5 Caracterización del recorrido

Una de las tareas más importantes para el proyecto fue el procesamiento de la información recabada por las videogramas. Se buscó la forma de caracterizar todos los procesos y tiempos que existen en un viaje del metro. La vida de un recorrido de cualquier estación “A” a una estación “B” puede ser descrito por los intervalos de tiempo y horarios marcados por el diagrama de la Figura 1.4. El tiempo total del recorrido de una estación “A” a una estación “B” se compone principalmente del *tiempo estación* y del *tiempo interestación*, cada uno de estos se compone a su vez de distintos procesos con sus intervalos de tiempo.

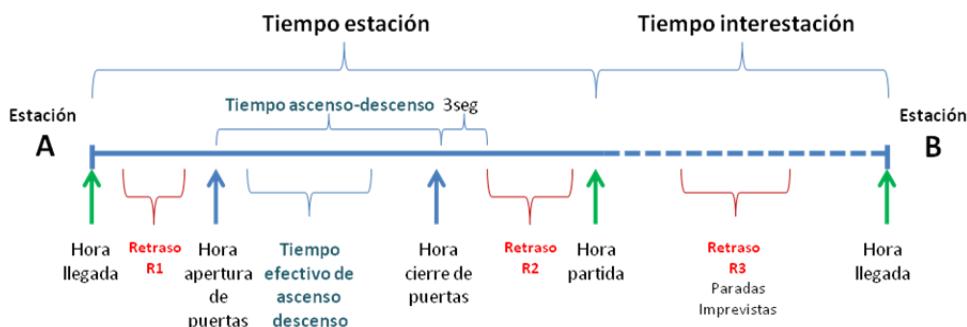


Figura 1.4. Caracterización del recorrido de una estación A hacia B.

El ciclo del recorrido es el siguiente:

1. **Hora llegada.** El ciclo del diagrama inicia cuando el tren arriba a la estación “A”, en el momento en que hace exactamente el alto total, se marca la hora de llegada Con este evento inicia el tiempo en estación.
2. **Retraso R1.** En ocasiones el metro retrasa la apertura de puertas en uno o dos segundos, incluso se tiene registro de un retraso de cuatro segundos. Lo más normal es que el metro abra las puertas inmediatamente al hacer alto total, este retraso es poco común pero existe.
3. **Hora apertura de puertas.** Es el momento exacto en el que se abren las puertas del metro.
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<sup>2</sup>.
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.
7. **3seg.** A través de los videos se observó que el tiempo adecuado y mínimo para que parte el tren después de la hora de cierre de puertas es de 3 segundos, es decir, las condiciones mecánicas del metro y la

<sup>2</sup> Este concepto se explicará a detalle en el Capítulo 5.

## Capítulo 1

conducción del operador hacen posible que este tiempo se respete. Después de los 3 segundos, ya puede ser considerado como retraso.

8. **Retraso R2.** Después de los 3 segundos, se empieza a contabilizar este retraso, debido a que el metro permanece en la estación parado sin ninguna actividad con puertas cerradas y sin permitir el ascenso-descenso. Posiblemente las causas se deban a que hay otro tren cercano a este o que el Regulador<sup>3</sup> no dé la salida por posibles fallas, etc., los factores de retraso pueden ser muy variados. Este retraso es de los más comunes.
9. **Hora de partida.** Es el momento cuando el metro inicia su avance. Con este evento termina el tiempo en estación.
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, pueden ser varios eventos, así que para contabilizarlos se debe de realizar una tabla tomando los tiempos de retraso de cada evento, el *Retraso R3* se compone de la suma de todos estos eventos.

Con estos intervalos de tiempos y horas precisas de los eventos se puede caracterizar de forma adecuada el viaje. La finalidad es hacer comparaciones entre estos tiempos para permitirnos tener medidas de desempeño. El proyecto se enfoca en los tiempos de ascenso y descenso pero no se puede hacerse un estudio adecuado si no se tienen los tiempos promedio generales.

---

<sup>3</sup> La figura de Regulador es la persona encargada de regular y controlar la línea a partir de las mediciones del Puesto Central de Control.

## 1.6 Tablas características de los viajes

Una carrera completa está compuesta por las medidas recabadas de estación a estación tomando como base el diagrama de la Figura 1.4 dando como resultado las *tablas características del viaje*<sup>4</sup>, las cuales tiene una serie de atributos que describen completamente el trayecto considerando las siguientes clases de atributos, datos generales (Tabla 1.2), tiempos generales del viaje (Tabla 1.3), tipos de retrasos (Tabla 1.4), velocidades del tren (Tabla 1.5) y la dinámica de los pasajeros (Tabla 1.6). A continuación se muestran los atributos de cada una de las tablas y la descripción de cada uno de ellos.

Datos generales	Línea del Metro, Dirección
	Fecha, Inicio de horario de grabación
	Interestación (nombre de la estación 1 y estación 2)
	Longitud interestación (metros)
	Longitud con estación (+150m por la dimensión de la plataforma)

Tabla 1.2. Datos generales de la línea y de la carrera que se está procesando.

Tiempos generales	Hora Llegada Hora exacta en la que el tren arriba a la estación con base en el tiempo de grabación. Las unidades están en segundos.
Hora Partida Hora exacta en la que el tren parte de la estación. Unidades en segundos.	
Tiempo Permanencia Estación El tiempo transcurrido en la estación, inicia en el momento en que el tren se detiene y finaliza cuando el tren parte. Es la diferencia entre el tiempo de llegada y el de partida.	

<sup>4</sup> La creación y definición de las tablas características del viaje fue una tarea larga, después del proceso de observación y de análisis se fue completando indicador por indicador hasta llegar a la forma general donde se encuentran caracterizados todos los tiempos.

## Capítulo 1

<b>Tiempo Duración Interestación</b>	El tiempo transcurrido en el trayecto del tren de estación en estación. Inicia cuando el tren parte de la estación y para cuando el tren se detiene en la estación siguiente.
<b>Hora Apertura de Puertas</b>	Hora exacta en la que el tren abre las puertas. Precisión de segundos.
<b>Hora Cierre de Puertas</b>	Hora exacta en la que el tren cierra las puertas. Precisión de segundos.
<b>Tiempo Puertas Abiertas (TPA)</b>	El tiempo transcurrido desde que abren hasta que cierran las puertas. Se calcula con la diferencia de estos tiempos. Precisión de segundos.
<b>Diferencia TPA-FIJO y Real</b>	Diferencia de tiempo entre tiempo de puertas abiertas teórico y con la medición real de TPA. Por ejemplo para la Línea 1 el tiempo teórico es de 24 segundos.

Tabla 1.3. Atributos con los tiempos generales de las carreras.

<b>Retrasos</b>	<b>Tiempo Retraso Apertura Puertas</b>	Es el tiempo que tarda el tren en abrir las puertas cuando ya está parado en la estación. Son poco segundos pero existe el retraso.
	<b>Tiempo Duración Retraso Partida</b>	Es el tiempo, medido en segundos, iniciando cuando cierra las puertas y hasta que parte. El retraso puede ser causado por muchos factores, por ejemplo hay algún tipo de obstrucción en las puertas que se identifica porque el tren nuevamente abre y cierra puertas en una o varias ocasiones. También se contabiliza el retraso que pueda haber después de que el metro cerró las puertas y no parte, hay segundos donde el tren está parado en la estación sin ningún motivo aparente.
	<b>Tiempo Retraso Interestación</b>	Es el retraso que se genera después de haber partido, en ocasiones hace alto total en los segmentos interestación y es cuando se contabiliza. En un segmento interestación pueden ocurrir varios eventos, así que se definió una nueva tabla con estos eventos, al final se suman los tiempos del retraso y se asignan en la tabla principal. El retraso interestación empieza a contabilizarse después que el tren arranca y llega a parar no importando si aún se encuentra en la plataforma (no se puede contabilizar como retraso en estación).

Tabla 1.4. Atributos con los tipos de retrasos.

Velocidad	<b>Velocidad promedio con retraso interestación</b> Se calcula la velocidad promedio utilizando la fórmula velocidad=distancia/tiempo considerando los tiempos de retrasos que pudieron surgir en el trayecto interestación.
	<b>Velocidad promedio sin retraso interestación</b> A partir de la distancia que hay entre estación y estación (segmento interestación) y el tiempo de recorrido se calcula velocidad promedio del viaje. Se utiliza la fórmula velocidad = distancia / tiempo. Se desprecia los momentos de aceleración, frenado y los retrasos.

Tabla 1.5. Atributos con las velocidades promedio del tren.

Dinámica de pasajeros	<b>Conteo zona vagón</b> Se hace un conteo parcial con ayuda de los ascensos y descensos previos, cuando hay la posibilidad se cuentan directamente los pasajeros, en grandes saturaciones los conteos son aproximados.
	<b>Suben Pasajeros</b> Por cada estación se lleva una contabilización de las personas que suben en una puerta específica.
	<b>Bajan Pasajeros</b> Por cada estación se contabiliza el número de personas que bajan en una puerta específica
	<b>Suben + Bajan</b> Es la suma de los pasajeros que “suben” y “bajan” en una estación determinada, esto nos indica la cantidad de movimiento que existe en un evento. Permite tener una medida de la afluencia en un momento preciso.
	<b>Tiempo Efectivo Ascenso Descenso (TEAD)</b> Es el tiempo invertido por los pasajeros que suben y bajan del vagón considerando los flujos principales, si llegan nuevos pasajeros después del intercambio del grupo principal ya no son contabilizados. Si hay un grado alto de saturación de pasajeros entonces el tiempo final de ascenso-descenso puede coincidir con el tiempo de permanencia del tren en la estación.
	<b>Hora Final TEAD</b> Se registra la hora en que termina el proceso de ascenso y descenso principal (TEAD).

# Capítulo 1

Suben + Bajan TEAD	Es el conteo de pasajeros que suben y bajan en un mismo evento de tiempo, iniciando desde que para el metro hasta que terminan de bajar y subir el cúmulo principal de personas. Si posteriormente llegan pasajeros ya no son contabilizados en esta variable debido a que ya no contribuyeron al evento principal.
Diferencia TPA y TEAD	Es la diferencia de tiempo entre el TPA y TEAD. Si es positiva, el proceso de ascenso y descenso terminó antes que el TPA, si es cero, el TPA acotó el TEAD posiblemente por saturación de pasajeros.
Diferencia TPA-Fijo y TEAD	Es la diferencia de tiempo entre un TPA teórico planeado para las líneas y el TEAD medido en el vagón.
Observación	Descripción puntual sobre lo acontecido en el proceso de ascenso-descenso en la estación y que no está contemplado en los atributos anteriores, por ejemplo, conductas inusuales de pasajeros.

Tabla 1.6. Atributos de la dinámica de pasajeros.

Se analizaron un conjunto de videos representativos identificados con las etiquetas 15, 32, 38, 41, 39, 42, 43, 45, 47, 49, 53, 51, 50 y 54 (ver Tabla 1.1). En la Imagen 1.5 a 1.7 se muestra la tabla característica del video 15.

Línea 1. Dirección Pantitlán-Observatorio		Lunes 16 de febrero de 2015, 07:59 am Tiempos generales										
Correspondencia con Línea	Interestación (Ubicación 1 - Ubicación 2)	Longitud interestación (m)	Longitud con Estación (+150m)	Hora Llegada	Hora Partida	Tiempo Permanencia Estación [min]	Tiempo Duración Interestación [min]	Hora Apertura de Puertas	Hora Cierre de Puertas	Tiempo Duración Puertas Abiertas [ms]	Tiempo Duración Puertas Abiertas [s]	Diferencia TPA Fijo y Real
1 5, 9, A	Pantitlán	-	-	01:07	03:42	02:35	-	01:07	02:54	01:47	107	83
2 -	Zaragoza	1,320	1,470	06:28	06:55	00:27	02:46	06:28	06:42	00:14	14	-10
3 -	Gómez Farías	762	912	08:18	08:43	00:25	01:23	08:18	08:36	00:18	18	-6
4 -	Gómez Farías	611	761	09:45	10:26	00:41	01:02	09:45	10:05	00:20	20	-4
5 -	Boulevard Puerto Aéreo	745	745	11:29	12:07	00:38	01:03	11:29	11:49	00:20	20	-4
6 -	Balbuena	595	853	13:19	13:46	00:27	01:12	13:19	13:35	00:16	16	-8
7 B	Moctezuma	478	628	14:41	16:23	01:42	00:55	14:41	15:10	00:29	29	5
8 4	San Lázaro	866	1,016	17:43	19:10	01:27	01:20	17:43	18:01	00:18	18	-6
9 -	Candelaria	698	848	20:19	20:57	00:38	01:09	20:19	20:37	00:18	18	-6
10 2	Merced	745	895	22:14	23:00	00:46	01:17	22:14	22:39	00:25	25	1
11 -	Pino Suárez	382	532	23:47	24:10	00:23	00:47	23:47	24:04	00:17	17	-7
12 8	Isabel la Católica	445	595	25:07	27:38	02:31	00:57	25:07	27:24	02:17	137	113
13 3	Saltón del Agua	458	608	28:36	29:27	00:51	00:58	28:36	28:59	00:23	23	-1
14 -	Balderrás	409	559	30:16	30:44	00:28	00:49	30:18	30:38	00:20	20	-4
15 -	Cuauhtémoc	793	943	31:54	32:27	00:33	01:10	31:54	32:17	00:23	23	-1
16 -	Insurgentes	645	795	33:29	34:00	00:31	01:02	33:29	33:51	00:22	22	-2
17 -	Sevilla	501	651	34:57	35:21	00:24	00:57	34:57	35:15	00:18	18	-6
18 -	Chapultepec	973	1,123	36:40	37:00	00:20	01:19	36:40	36:53	00:13	13	-11
19 7,9	Juárez	1,158	1,308	38:27	39:19	00:52	01:27	38:27	39:13	00:46	46	22
20 -	Observatorio	1,262	1,412	41:35	41:57	00:22	02:16	41:35	41:54	00:19	19	-5
		Sumas Totales	13804	16654	17:01	23:49				10:23	623	143
		Promedios	726.53	876.53			00:51	01:15		00:31	31.15	2.38
						41.67%	58.33%	40:50			32.20	
Tiempo viaje total (min)												

Imagen 1.5. Primer fragmento de la tabla característica del video 15.

## Obtención y procesamiento de información

Diferencia TPA_Fijo y Real	Velocidades												Video No. 15									
	Retraso			Velocidad			Dinámica de pasajeros						TPA_Fijo y TEAD					Observaciones				
	Tiempo Apertura Puertas (min)	Duración Retraso Partida (ms)	Tiempo Retraso Interés (ms)	Velocidad promedio (m/s)	Velocidad promedio sin retraso inter (m/s)	Velocidad media sin retraso inter (km/h)	Conteo Total en Zona	Suben Pasajeros	Bajan Pasajeros	Suben Bajan	Suben + Bajan Primer Cúmulo	Hora Final Ascenso Descenso	Tiempo Efectivo Ascenso Descenso	Ascenso Descenso	Primer Cúmulo	Diferencia TEAD (seg)	Diferencia TPA y TEAD (seg)					
83	00:00	00:48	00:00:03	8.85	11.22	40.40	27	23	0	23	18	01:22	15	15	92	9	9	Nadan 4 personas				
-10	00:00	00:13	00:00:35	10.99	10.99	39.56	39	9	0	9	00:40	32	27	2	12	2	12	Subieron 6 amigas				
-5	00:00	00:07	00:00:00	11.83	11.83	42.57	42	2	0	1	09:53	08	08:29	11	11	7	13	13 Sube un hombre				
-4	00:00	00:21	00:00:00	11.83	11.83	42.57	42	2	2	2	11:44	15	15	5	8	12	16	Hicieron el inter				
-4	00:00	00:18	00:00:00	11.83	11.83	42.57	42	0	0	0	13:19	00	0	0	0	15	5	9	Sube un hombre			
-8	00:00	00:11	00:00:00	11.83	11.83	42.65	42	0	0	0	13:19	00	0	0	0	15	0	24	Ya no pudieron subir			
5	00:00	01:13	00:00:00	11.42	11.42	41.11	46	4	0	4	15:03	22	22	7	7	2	2	2	Plataforma sumaria			
-6	00:00	01:09	00:00:00	12.70	12.70	45.72	46	2	2	4	18:00	37	17	1	1	7	7	7	Es muy difícil el ascenso			
-5	00:00	00:20	00:00:00	12.29	12.29	44.24	44	0	2	2	20:28	09	0	0	0	9	9	15	Corren para subir			
1	00:00	00:21	00:00:00	11.62	11.62	41.84	42	7	9	16	22:32	38	18	7	7	6	6	6 Sube tres personas				
-7	00:00	00:06	00:00:00	11.32	11.32	40.75	42	1	1	2	23:53	06	6	6	11	11	18	Baja una persona				
113	00:00	00:14	00:00:00	10.44	10.44	37.58	51	12	3	15	15:29	22	22	115	2	2	2	Llega a un nuevo				
-1	00:00	00:28	00:00:00	10.48	10.48	37.74	53	7	5	12	28:59	23	23	0	0	1	1	1 Se supera el recorrido				
-4	00:00	00:06	00:00:00	11.42	11.42	41.07	53	0	2	2	30:50	14	14	0	0	6	6	6 Corren para subir				
-1	00:00	00:10	00:00:00	13.47	13.47	48.50	41	5	15	20	32:13	38	18	5	5	6	6 De los 15 que bajaron					
-2	00:00	00:00	00:00:00	12.82	12.82	46.16	37	1	5	5	33:39	10	10	12	14	14 Una persona tuvo que bajar						
-6	00:00	00:06	00:00:00	11.42	11.42	41.12	26	1	12	13	35:08	11	11	7	7	13	13 Por primera vez y					
-11	00:00	00:07	00:00:00	14.22	14.22	51.17	25	2	3	5	36:47	07	7	6	17	17 El vagón se enciende						
22	00:00	00:06	00:00:00	15.03	15.03	54.12	26	9	8	17	15:30	14	14	32	10	10 Al final entro un pasajero						
-5	00:00	00:03	00:00:17	10.38	11.87	42.72	13	0	15	13	13:10	10	10	7	7	14	14 Descenso final.					
143	00:02	00:36	00:52	11.83	12.04	43.33	38.65	769	89	80	169	162	04:22	262	361	218						
238													00:13	13	18	11						
													13:10									
													00:59									

Imagen 1.6.Segundo fragmento de la tabla característica del video 15. Las celdas en rojo y ámbar muestran los datos de la dinámica de pasajeros de la zona “D”

Retraso compensación 3segx2destaciones (min:seg)	Tiempo Apertura de Puertas Fijo (seg)	ID Interés	Tiempo inicial	Tiempo final	Retraso interés Evento
01:00	24	2	04:03	04:38	00:35
		20	40:52	41:09	00:17

(a)

(b)

Imagen 1.7.Tablas complementarias, en (a) se define el tiempo de compensación de 3 segundos para el cierre de puertas y el tiempo de TAP-Fijo para la línea 1 que es de 24 segundos, en (b) se encuentran definidos los eventos de los retrasos interés.

La función de las tablas características es sintetizar y homogenizar la información de los videos, es decir, una carrera de 30 minutos genera un archivo aproximado de 320 MB de información que se tiene que procesar, mientras que una carrera de 1 hora con 30 minutos genera un archivo de 1100 MB, la diferencia es de un 70% de información mientras que las tablas características resume toda esta información en indicadores que son útiles para analizar.

## Capítulo 1

# **Capítulo 2**

## **Indicadores globales de rendimiento de la línea del Metro**

Al recabar los datos se tiene la posibilidad de encontrar regularidades, describir procesos, comparar dinámicas y establecer relaciones entre las variables de estudio. Para realizar esta tarea es primordial contar con las tablas características de los videos.

El análisis consta de dos grupos de gráficas, el primero para el análisis global de la línea, donde se consideran los datos recabados de las carreras completas como los tiempos totales de viaje (tiempo estación y tiempo interestación), los retrasos totales y las velocidades promedio; y el otro grupo donde se analiza el proceso de ascenso y descenso de pasajero en las estaciones<sup>5</sup>. En este capítulo se describirán las gráfica que se pueden obtener de los indicadores globales usando a la línea 1 como ejemplo.

---

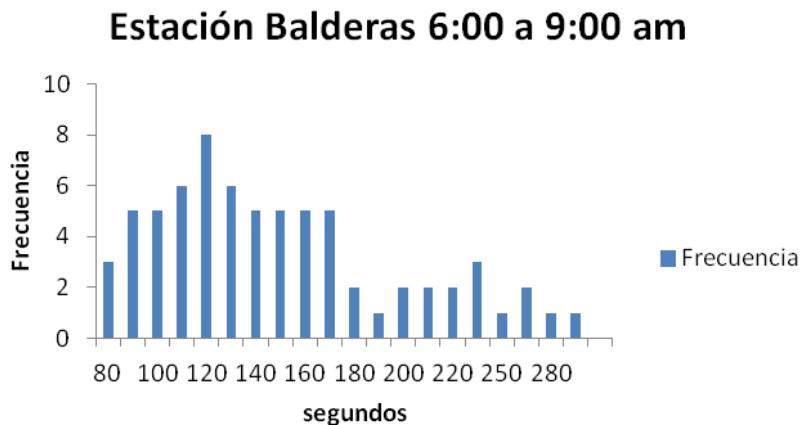
<sup>5</sup> En la propuesta original del proyecto solo se consideró el estudio del proceso de ascenso y descenso de pasajeros y no el del rendimiento de la línea, es indispensable realizar los dos por que la forma en la que actúan los pasajeros depende de lo que sucede a lo largo de la línea, no se pueden aislar los procesos.

## 2.1 Frecuencia de intervalos de paso (headway)

Los intervalos de tiempo de paso de los trenes (headway) es una medida de desempeño del sistema. La forma óptima para dar servicio a los pasajeros es cuando el headway es regular, si es irregular indica que hay retrasos y posiblemente la formación de cúmulos de trenes.

Para tener una medida de desempeño fiable, se necesita medir durante 3 horas la frecuencia de paso de los trenes en una estación específica, posteriormente realizar *Histogramas de frecuencias* para observar el comportamiento del sistema. Si el headway es muy regular observaremos una única barra si no es regular posiblemente tengamos una distribución Poisson con media el tamaño del intervalo más frecuente.

En la Gráfica 2.1 se observa la media en exactamente 120 segundos (2min), con una dispersión importante hacia la derecha, lo que indica que el servicio puede ser irregular por momentos.



Gráfica 2.1. Histograma de la frecuencia de paso medido en la estación Balderas.

## 2.2 Proporciones de tiempo de viaje

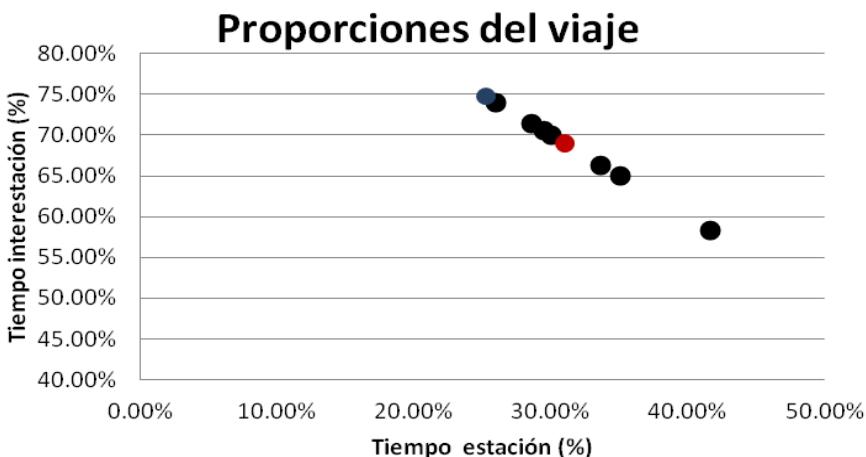
Esta gráfica describe las proporciones del tiempo invertidos en el viaje considerando el tiempo estación y el tiempo interestación. Esto permite visualizar las cotas superiores y cotas inferiores en los tiempos de permanencia en las estaciones y los tiempos interestación. También permite reconocer que no importando la duración del viaje, las proporciones de los tiempos (estación e interestación) se mantienen en un rango acotado, esto implica lo siguiente, que sí la línea tiene un rendimiento pobre (servicio lento) lo es tanto en la permanencia en las estaciones como en el trayecto interestación. Si la línea tiene un buen rendimiento se refleja en ambos tiempos. Siempre el tiempo interestación en promedio es mayor al tiempo estación. En la Tabla 2.1 se muestran los tiempos de las corridas obtenidos de los videos.

Video	Tiempo estación (min)	Tiempo interestación (min)	Tiempo estación (%)	Tiempo interestación (%)	Tiempo promedio estación (min)	Tiempo promedio interestación (min)	tiempo viaje total (min)	Retraso general (min)	Tiempo puertas abiertas (min)
15	17:01	23:49	41.67%	58.33%	00:51	01:15	40:50	06:30	10:23
32	14:15	33:14	30.01%	69.99%	00:43	01:45	47:29	07:32	11:01
38-41	16:39	30:50	35.06%	64.94%	00:50	01:37	47:29	07:54	12:30
39-42	09:39	23:05	29.48%	70.52%	00:29	01:13	32:44	01:37	07:03
43	11:33	22:47	33.64%	66.36%	00:35	01:12	34:20	01:15	09:20
45-47	28:23	01:03:05	31.03%	68.97%	01:25	03:19	01:31:28	46:28	10:00
49-53	20:20	57:55	25.99%	74.01%	01:01	03:03	01:18:15	25:03	18:15
51	09:23	23:26	28.59%	71.41%	00:28	01:14	32:49	02:34	06:30
50-54	07:42	22:47	25.26%	74.74%	00:23	01:12	30:29	00:57	06:09
Promedio	14:59	33:26	31.19%	68.81%	00:45	01:46	48:26	11:06	10:08

Tabla 2.1. Tiempos generales de las corridas.

## Capítulo 2

Esta tabla permite comparar las diferentes corridas, la mejor corrida es la marcada en azul, duro 30 minutos con 29 segundos, en promedio se cumplieron los 24 segundos que debe tardar el metro en la estación, esta corrida tuvo muy poco afluencia de pasajeros (para detalles ver la tabla característica del video). Los porcentajes nos indican las proporciones de tiempo invertido en la estación y en la interestación, esto no indica si el rendimiento del viaje es bueno o malo, por ejemplo, el video 49-53 tienen casi los mismos porcentajes que el video 50-54. Lo que se puede suponer (con los pocos datos que se obtuvieron), es que la proporción del tiempo estación puede estar acotada inferiormente por el 25% y superiormente por el 50%. Y complementariamente el tiempo interestación puede acotarse inferiormente por el 50% y superiormente por el 75%. Esto se aprecia en la Gráfica 2.2. Esto puede generar varias preguntas, por ejemplo, ¿qué calidad de viaje se generaría si los porcentajes de tiempo en estación y tiempo interestación fueran 50% - 50% respectivamente, o si fuera 25% y 75%? Es una pregunta abierta que merece ser investigada. Por los datos se observa que la Línea 1 tiene una proporción de tiempo en estación del 30% (más o menos un margen) y un tiempo interestación del 70% (más o menos un margen)

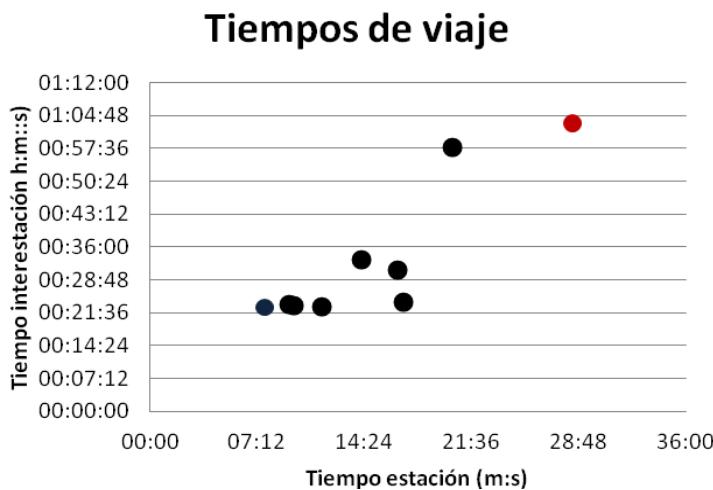


Gráfica 2.2. El punto en azul muestra los porcentajes del mejor viaje y el punto en rojo el peor de los viajes.

## 2.3 Tiempos absolutos de viaje

Está gráfica muestra los valores de los tiempos estación contra los tiempos interestación, se observa la variabilidad de los tiempos que pueden ocurrir en los viajes, si la línea tiene un buen rendimiento la variabilidad será pequeña ya que los viajes presentarán poco retraso tanto en tiempo estación como tiempo interestación. Para la Línea 1, por ejemplo, resulta que son más estables los tiempos interestación, es decir, se mantienen en un rango acotado, lo que indica que la variabilidad del tiempo de viaje total es por la dinámica de las estaciones, ya sea por retrasos de los usuarios en altas saturaciones o por el estacionamiento prolongado del tren debido a factores ajenos.

En la Gráfica 2.3 se muestran las variables *tiempo estación - tiempo interestación* de las carreras completas, cada punto permite reconocer el rendimiento del viaje de forma general, en este caso, mientras más pegado al origen, más rápido fue el viaje, mientras más alejando esté (esquina superior derecha), menos eficiente. El record de tiempo interestación es de 22:47 minutos, este valor puede considerarse como una cota inferior.



Gráfica 2.3. Se observa una cota inferior en el tiempo interestación de aproximadamente 22 minutos y en el tiempo estación de 7 minutos.

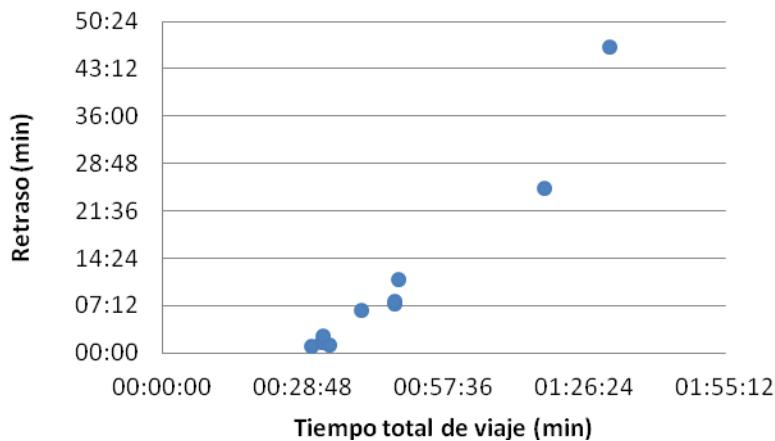
## 2.4 Retrasos en tiempos de viaje

El retraso general del viaje es la suma de el retraso de apertura de puertas, el retraso de partida del tren y los paros en el segmento interestación (ver Tabla 1.7). El retraso general del viaje graficado contra el tiempo de viaje total indica una medida de desempeño de las carreras. Este retraso crece exponencialmente conforme el tiempo de viaje aumenta. También se observa que los retrasos “normales”, considerando todo el viaje, pueden ir de 1 a 14 minutos, mientras que los más grandes van de 25 a 50 minutos.

En la Gráfica 2.4 se muestra el tamaño del retraso en función del tiempo de viaje total, se espera que los retrasos de las carreras con tiempos de viaje pequeños estén compuestos por la suma de pequeños retrasos a lo largo del trayecto, mientras que tiempos de viaje grandes, estén compuestos de retrasos grandes, este razonamiento es debido a que la velocidad del tren no es proporcional al retraso.

Otro factor importante es el intervalo de puertas abiertas ya que impacta en el tiempo de viaje y a su vez en los valores del retraso, podemos tener un viaje hipotético donde el tiempo de puertas abiertas sea más largo y no tener retraso; por el otro lado un viaje con retraso y tiempo de apertura de puertas pequeño y tener el mismo tiempo general de viaje. Por ejemplo la carrera del video 32 y 38-41 tienen el mismo tiempo de viaje pero distintos retrasos, la apertura de puertas tuvo mayor duración en el video 38-41 y menor en el video 32.

Si la tendencia de la gráfica es correcta, dado el tiempo de viaje total, se podría pronosticar el tiempo de retraso. Faltan aún más datos para alimentar la gráfica de retrasos pero da un indicio del comportamiento general.



Gráfica 2.4. Retrasos en tiempo total de viaje.

## 2.5 Velocidades promedio por estación

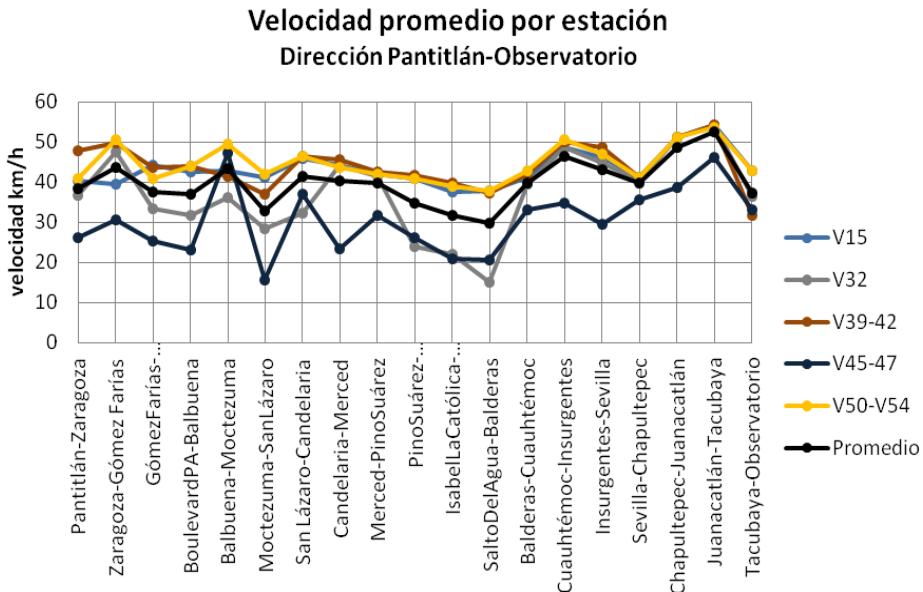
Las velocidades promedio de los trenes en los segmentos interestación son consideradas como un indicador del rendimiento. Permite analizar los segmentos más lentos o conflictivos de la línea y los más rápidos, esto depende de muchos factores, la afluencia de los pasajeros, fallas mecánicas, perdida de señal en los puestos de control, etc. Por cada dirección de la línea se debe considerar una gráfica de este tipo. Es común que una dirección se encuentre saturada y la otra no debido a los patrones de viaje de los pasajeros.

Las dos direcciones de la Línea 1, Pantitlán-Observatorio, Observatorio-Pantitlán, presentan comportamientos distintos a causa de varios factores como la afluencia de pasajeros, el horario de operación y la geografía. Por lo tanto un indicador importante para medir el rendimiento de la Línea es la velocidad de los trenes a lo largo del trayecto.

A partir de las tablas características de las carreras se pueden calcular las velocidades promedio. La forma en la que se calculó estas velocidades es aproximada ya que no tenemos las medidas reales. Con la información del tiempo de recorrido, restando el tiempo acumulado de los retrasos

## Capítulo 2

interestación<sup>6</sup>, y la longitud del segmento interestación, se puede hacer una estimación razonable de las velocidades.



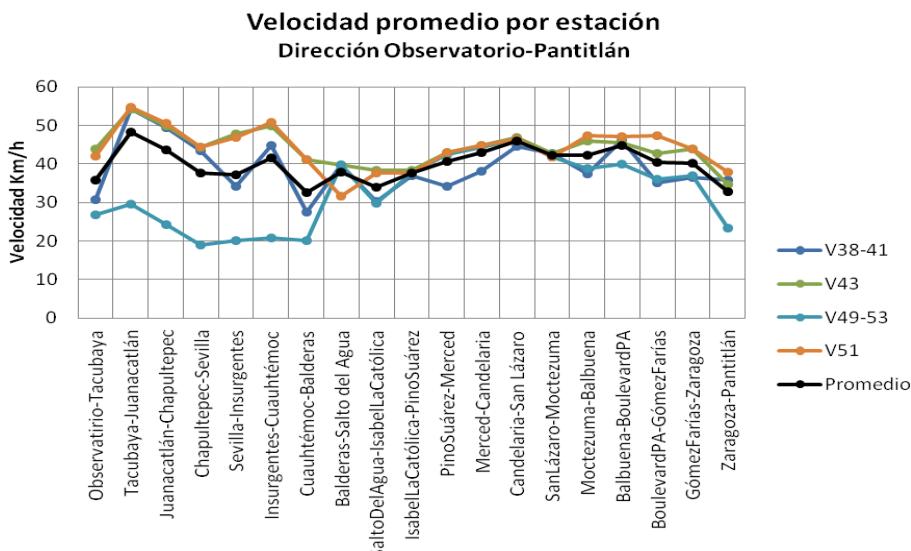
Gráfica 2.5. Velocidades promedio de un conjunto de carreras completas.

En la Gráfica 2.5 se observan las velocidades promedio por segmento interestación a lo largo de la Línea 1 en la dirección Pantitlán-Observatorio. El rendimiento de la línea decae en la parte central, principalmente en el segmento interestación Salto del Agua–Balderas, en esta región se encuentran las velocidades más lentas, esto puede ser causado por la gran afluencia de gente que existe en las dos estaciones, al retrasar la salida de trenes en la estación Balderas los trenes deben ir más lentos para no formar cúmulos. De Balderas a Observatorio la línea se estabiliza y hay un incremento de velocidad. También se observa en la gráfica la variación de las velocidades pero mantiene un cierto patrón, la primera mitad de la línea

<sup>6</sup> Los retrasos interestación son identificados a través de los videos y contabilizados por evento, es decir, en un segmento interestación pueden haber varios altos, se toman los tiempos de parada, y al final se suman para tener el retraso total del segmento interestación.

presenta un rango grande de velocidades, y en la segunda mitad las velocidades son mucho más homogéneas. La medición más lenta fue de 15.7 km/h en promedio en el segmento interestación Moctezuma–San Lázaro, el 2 de marzo de 2015 aproximadamente a las 9:56 am. El trayecto más rápido fue de 54.12 km/h en promedio en el segmento interestación Juanacatlán–Tacubaya el 16 de Febrero de 2015 aproximadamente a las 8:36 am. Se observa que el segmento más rápido es Juanacatlán-Tacubaya en todos los casos. Las velocidades promedio (línea negra) muestra que tienen un rango de entre 30 a 52 km/h, de hecho el promedio de todas las velocidades promedio es de 39.87 Km/h.

En la Gráfica 2.6 se encuentran las velocidades promedio de la Línea 1 dirección Observatorio-Pantitlán. Los datos del video 38-41 muestran una baja de velocidad bastante notoria debido a un desperfecto de la Línea en ese horario, las otras series muestran un rendimiento parecido. Conjuntando la información de la Gráfica 2.5, las velocidades más altas surgen al inicio de la línea en el segmento Observatorio-Cuauhtémoc, posteriormente hay un descenso de velocidades y se recupera un poco hasta Pino Suárez-Merced, posteriormente se mantiene en alrededor de 40 km/h y llega a un descenso al final de la línea.



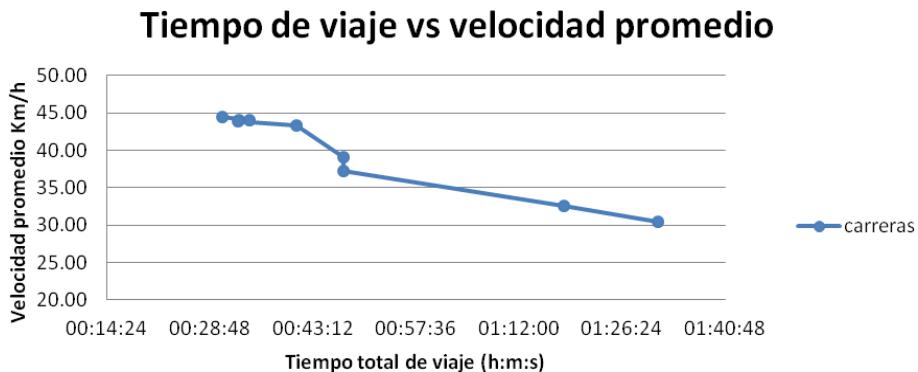
Gráfica 2.6. Velocidades promedio de un conjunto de carreras completas.

## Capítulo 2

Las medición más rápidas fueron de una velocidad promedio de 18.9 km/h en el segmento interestación Chapultepec-Sevilla el 3 de abril de 2015 alrededor de las 7:45 pm y la más alta fue una velocidad promedio de 54.75 Km/h en el segmento Tacubaya-Juanacatlán el mismo día pero en un horario de 9:30 pm. Es interesante saber por qué el segmento Tacubaya-Juanacatlán presenta los tiempos más altos.

El valor promedio general de todas las carreras dirección Observatorio-Pantitlán es de 39.89 Km/h, es un valor prácticamente igual al promedio de la otra dirección (Pantitlán-Observatorio), lo que indica que el rendimiento de la línea es muy parecido en ambos lados, considerando horarios de saturación.

Considerando los datos y gráficas anteriores es de suponer que las carreras con mejor tiempo de viaje son las que van a mayor velocidad. Para confirmar esta hipótesis presentamos la Gráfica 2.7.



Gráfica 2.7. Los puntos indican el tiempo de viaje y la velocidad promedio del grupo de carreras que se analizó.

Los viajes más rápidos tienen una velocidad entre 40 y 45 Km/h, y los más lentos entre 30 y 35 Km/h. La variación de la velocidad promedio no es tan sustancial como el tiempo total de viaje, lo que indica la existencia de otros factores para hacer que el viaje sea largo.

## 2.6 Distribuciones de probabilidad en horarios específicos

Las distribuciones de probabilidad en horarios específicos son un corte transversal a la dinámica de afluencia de pasajeros de todo el día. Es muy importante tener esta información ya que dependiendo la hora del día se pueden tomar medidas preventivas, se pueden crear estrategias de regulación que incluya el conjunto de trenes e intervenciones en las estaciones para guiar o regular el flujo de los pasajeros. Las series de tiempo de los ascensos y descensos ayudan a construir estas distribuciones, no se necesitan tomar las mediciones de todos los vagones, con una medida representativa se puede lograr, sin embargo, es indispensable tomar varias medidas en el intervalo de tiempo que se desea analizar.

En la Tabla 2.2 y Tabla 2.3 se muestran los datos para obtener las probabilidades de llegada y de salida de los pasajeros en las estaciones en el intervalo de tiempo de las 8:00 a las 9:30 am. La Tabla 2.2 muestra los conteos de personas que subieron en la primera o última sección del vagón PR y la Tabla 2.3 las personas que bajaron en el mismo recorrido. Se considera como premisa que los usuarios se distribuyen homogéneamente sobre la plataforma de tal manera que en todos los vagones existen una cantidad de personas semejante. Por cada estación se calcula el promedio de pasajeros que suben y que bajan. Posteriormente se normalizan para obtener la probabilidad de llegada y de salida.

## Capítulo 2

Pasajeros que suben por estación 8:00 - 9:30 hrs.									
Estación	07:59 V15	08:07 V32	08:56 V45	08:56 V47	Suma	Promedio	Probabilidad Llegada	Desviación Estándar	
Pantitlán	23	15	18	20	76	19.00	0.2209	3.37	
Zaragoza	9	10	23	25	67	16.75	0.1948	8.42	
Gómez Farías	3	4	13	8	28	7.00	0.0814	4.55	
Boulevard PA	1	2	10	4	17	4.25	0.0494	4.03	
Balbuena	2	1	2	2	7	1.75	0.0203	0.50	
Moctezuma	0	1	2	1	4	1.00	0.0116	0.82	
San Lázaro	4	1	7	2	14	3.50	0.0407	2.65	
Candelaria	2	1	2	4	9	2.25	0.0262	1.26	
Merced	0	0	1	2	3	0.75	0.0087	0.96	
Pino Suárez	7	8	4	6	25	6.25	0.0727	1.71	
Isabel la Católica	1	0	0	3	4	1.00	0.0116	1.41	
Salto del Agua	1	11	8	9	29	7.25	0.0843	4.35	
Balderas	7	12	4	5	28	7.00	0.0814	3.56	
Cuauhtémoc	0	0	0	2	2	0.50	0.0058	1.00	
Insurgentes	5	3	0	0	8	2.00	0.0233	2.45	
Sevilla	1	5	0	0	6	1.50	0.0174	2.38	
Chapultepec	1	0	0	1	2	0.50	0.0058	0.58	
Juanacatlán	2	0	0	0	2	0.50	0.0058	1.00	
Tacubaya	9	2	0	2	13	3.25	0.0378	3.95	
Observatorio	0	0	0	0	0	0.00	0.0000	0.00	
<b>Totales</b>					<b>344</b>	<b>86.00</b>	<b>1.00</b>		

Tabla 2.2. Probabilidades de llegada dirección Pantitlán-Observatorio por la mañana.

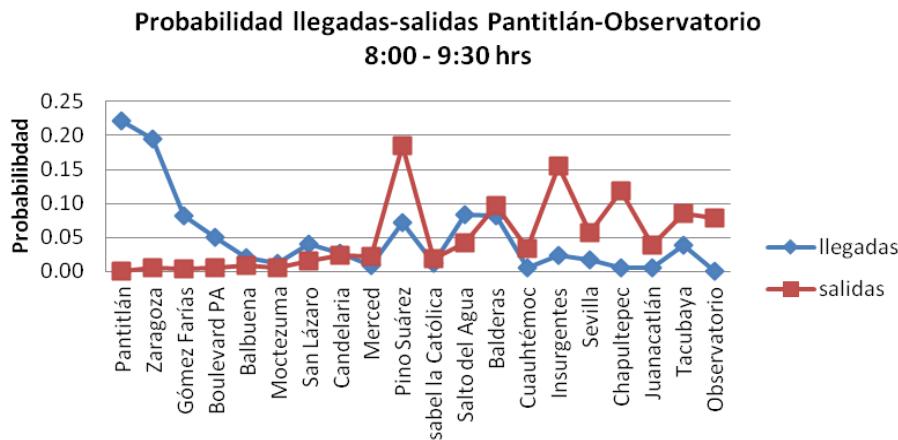
Estación	Pasajeros que bajan por estación 8:00 - 9:30 hrs.				Suma	Promedio	Probabilidad Salida	Desviación Estándar
	07:59 V15	08:07 V32	08:56 V45	08:56 V47				
Pantitlán	0	0	0	0	0	0.00	0.0000	0.00
Zaragoza	0	2	0	0	2	0.50	0.0061	1.00
Gómez Farías	0	0	0	1	1	0.25	0.0030	0.50
Boulevard PA	0	0	2	0	2	0.50	0.0061	1.00
Balbuena	0	0	3	0	3	0.75	0.0091	1.50
Moctezuma	0	0	1	1	2	0.50	0.0061	0.58
San Lázaro	0	0	4	1	5	1.25	0.0152	1.89
Candelaria	2	3	1	2	8	2.00	0.0242	0.82
Merced	2	1	2	2	7	1.75	0.0212	0.50
Pino Suárez	9	17	15	20	61	15.25	0.1848	4.65
Isabel la Católica	1	0	3	2	6	1.50	0.0182	1.29
Salto del Agua	3	2	5	4	14	3.50	0.0424	1.29
Balderas	5	8	10	9	32	8.00	0.0970	2.16
Cuauhtémoc	2	1	4	4	11	2.75	0.0333	1.50
Insurgentes	15	14	10	12	51	12.75	0.1545	2.22
Sevilla	5	6	4	4	19	4.75	0.0576	0.96
Chapultepec	12	16	8	3	39	9.75	0.1182	5.56
Juanacatlán	3	6	1	3	13	3.25	0.0394	2.06
Tacubaya	8	10	3	7	28	7.00	0.0848	2.94
Observatorio	13	5	3	5	26	6.50	0.0788	4.43
<b>Total</b>					<b>330</b>	<b>82.50</b>	<b>1.00</b>	

Tabla 2.3. Probabilidad de salida dirección Pantitlán-Observatorio por la mañana.

En la Gráfica 2.8 se muestran las probabilidades de llegada y de salida por estación. Como es de esperarse las estaciones con mayor arribo de pasajeros en el horario de la mañana son Pantitlán y Zaragoza, el 40% de los pasajeros que utilizan la línea en este horario suben en estas dos primeras estaciones. Las estaciones San Lázaro, Pino Suárez, Salto del Agua y Balderas generan

## Capítulo 2

un 30% de afluencia, y las otras 14 estaciones el 30% restante. Por otro lado, para los porcentajes de salida se tiene que Pino Suárez, Balderas, Insurgentes y Chapultepec generan aproximadamente el 55% de los pasajeros que salen, las otras 16 estaciones generan la otra mitad.



Gráfica 2.8. Probabilidades de llegada y de salida dirección Pantitlán-Observatorio por la mañana.

Con este perfil de la línea para este horario en específico se pueden crear estrategias de regulación adecuadas para su dinámica. Se pueden considerar algún tipo de dosificación de pasajeros y/o la aplicación de estrategias tipo “tren en vacío”.

El otro intervalo de tiempo donde la Línea 1 presenta saturaciones y retrasos es en la noche de 7:00 a 9:30 pm. Las Tabla 2.4 y 2.5 muestran los datos obtenidos de las carreras Observatorio – Pantitlán en este horario.

Indicadores globales de rendimiento

Pasajeros que suben por estación 19:00 - 21:30 hrs.										
Estación	19:13 V41	19:13 V38	20:55 V43	19:18 V49	19:18 V53	21:21 V51	Suma	Promedio	Prob. Llegada	Desv. Estándar
<b>Observatorio</b>	7	9	4	0	0	10	30	5.00	0.0758	4.38
<b>Tacubaya</b>	5	5	4	0	0	12	26	4.33	0.0657	4.41
<b>Juanacatlán</b>	3	0	0	0	0	1	4	0.67	0.0101	1.21
<b>Chapultepec</b>	10	5	1	0	0	9	25	4.17	0.0631	4.54
<b>Sevilla</b>	1	5	4	0	0	5	15	2.50	0.0379	2.43
<b>Insurgentes</b>	7	10	9	0	0	7	33	5.50	0.0833	4.42
<b>Cuauhtémoc</b>	0	2	0	0	0	1	3	0.50	0.0076	0.84
<b>Balderas</b>	10	9	8	28	24	0	79	13.17	0.1995	10.63
<b>Salto del Agua</b>	7	1	0	7	8	1	24	4.00	0.0606	3.69
<b>Isabel la Católica</b>	4	3	2	6	8	2	25	4.17	0.0631	2.40
<b>Pino Suárez</b>	8	11	10	8	8	7	52	8.67	0.1313	1.51
<b>Merced</b>	5	1	0	1	0	3	10	1.67	0.0253	1.97
<b>Candelaria</b>	1	3	1	4	2	0	11	1.83	0.0278	1.47
<b>San Lázaro</b>	2	0	4	6	4	3	19	3.17	0.0480	2.04
<b>Moctezuma</b>	0	2	0	2	2	0	6	1.00	0.0152	1.10
<b>Balbuena</b>	1	2	0	0	1	0	4	0.67	0.0101	0.82
<b>Boulevard PA</b>	4	5	3	4	5	0	21	3.50	0.0530	1.87
<b>Gómez Farías</b>	0	0	1	4	2	1	8	1.33	0.0202	1.51
<b>Zaragoza</b>	1	0	0	0	0	0	1	0.17	0.0025	0.41
<b>Pantitlán</b>	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.0000	0.00
<b>Totales</b>							<b>396</b>	<b>66.00</b>	<b>1.00</b>	

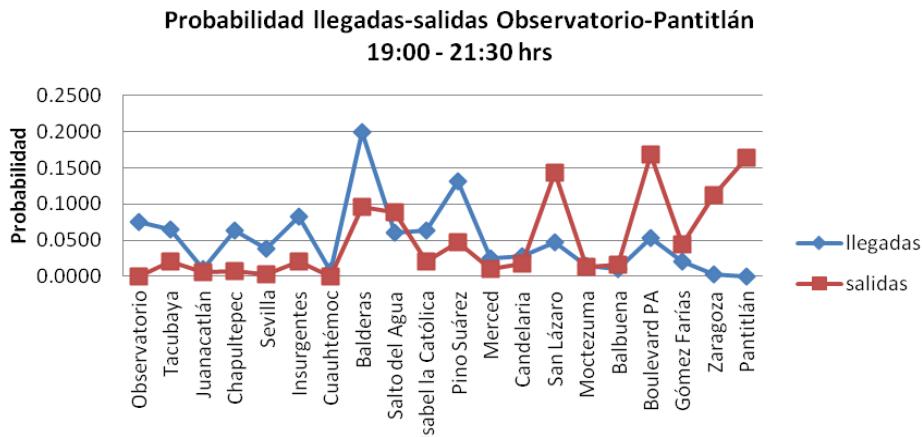
Tabla 2.4. Probabilidades de llegada Observatorio-Pantitlán en horario de 19:00 a 21:30 hrs.

## Capítulo 2

Estación	Pasajeros que bajan por estación 19:00 -21:30 hrs.						Suma	Promedio	Prob. Salida	Desv. Estándar
	19:1 3 V41	19:1 3 V38	20:5 5 V43	19:1 8 V49	19:1 8 V53	21:2 1 V51				
	V41	V38	V43	V49	V53	V51				
<b>Observatorio</b>	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.0000	0.00
<b>Tacubaya</b>	2	1	0	0	0	5	8	2.00	0.0208	1.97
<b>Juanacatlán</b>	0	0	2	0	0	0	2	0.50	0.0052	0.82
<b>Chapultepec</b>	0	1	1	0	0	1	3	0.75	0.0078	0.55
<b>Sevilla</b>	0	1	0	0	0	0	1	0.25	0.0026	0.41
<b>Insurgentes</b>	0	0	2	0	0	6	8	2.00	0.0208	2.42
<b>Cuauhtémoc</b>	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.0000	0.00
<b>Balderas</b>	14	14	2	0	0	7	37	9.25	0.0964	6.59
<b>Salto del Agua</b>	11	7	2	3	7	4	34	8.50	0.0885	3.33
<b>Isabel la Católica</b>	0	2	0	2	2	2	8	2.00	0.0208	1.03
<b>Pino Suárez</b>	0	3	3	3	3	6	18	4.50	0.0469	1.90
<b>Merced</b>	3	0	0	1	0	0	4	1.00	0.0104	1.21
<b>Candelaria</b>	0	1	1	4	1	0	7	1.75	0.0182	1.47
<b>San Lázaro</b>	11	5	8	11	12	8	55	13.75	0.1432	2.64
<b>Moctezuma</b>	1	1	0	2	1	0	5	1.25	0.0130	0.75
<b>Balbuena</b>	1	1	2	1	0	1	6	1.50	0.0156	0.63
<b>Boulevard PA</b>	5	14	8	15	11	12	65	16.25	0.1693	3.76
<b>Gómez Farías</b>	1	4	0	3	5	4	17	4.25	0.0443	1.94
<b>Zaragoza</b>	10	5	6	12	7	3	43	10.75	0.1120	3.31
<b>Pantitlán</b>	18	12	9	13	8	3	63	15.75	0.1641	5.09
<b>Totales</b>							<b>384</b>	<b>96.00</b>	<b>1.00</b>	

Tabla 2.5. Probabilidades de salida Observatorio-Pantitlán en horario de 19:00 a 21:30 hrs.

La Gráfica 2.9 se realizó con el mismo procedimiento tomando los datos de las Tablas 2.4 y 2.5.



Gráfica 2.9. Probabilidades de llegada y salida durante la noche.

Se observa que el segmento de la Línea 1 comprendido de Balderas a Pino Suárez tiene la mayor carga de llegadas, el 45 % de los pasajeros subieron en estas 4 estaciones. Cabe resaltar que la muestra contiene videos donde el metro hizo parada hasta la estación Balderas (ver Tabla 2.4 y 2.5), lo que implicó que la probabilidad de llegada creciera en esta estación. Si no fuera por este evento la estación Pino Suárez sería la de mayor afluencia. En este horario las personas regresan a sus lugares de origen, por tal motivo ahora las estaciones donde bajan más pasajeros es San Lázaro, Boulevard Puerto Aéreo, Zaragoza y Pantitlán con un 58% de pasajeros que salen.

Estas gráficas indican que el patrón de viaje del usuario de la Línea 1 es bastante regular, por la mañana los usuarios que suben en Pantitlán empiezan a bajar a partir de la estación Pino Suárez, es decir, el comportamiento de la primera mitad de la línea está enfocado principalmente a las subidas o llegadas, la segunda mitad se enfoca a las bajadas o salidas. Por la noche el comportamiento es invertido, los usuarios empiezan a bajar en Balderas, y los porcentajes más importantes en salidas es al final de la línea.

## Capítulo 2

En los Tablas 2.6 y 2.7 se muestran los datos para construir una gráfica de probabilidades de llegada y de salida para el horario de 8:00 – 9:30 pm dirección Pantitlán Observatorio.

Pasajeros que suben por estación 20:00 - 21:30 hrs.								
Estación	20:20 V39	20:20 V42	20:41 V50	20:41 V54	Suma	Promedio	Probabilidad Llegada	Desviación Estándar
<b>Pantitlán</b>	1	0	7	2	10	2.50	0.0935	3.11
<b>Zaragoza</b>	1	0	0	0	1	0.25	0.0093	0.50
<b>Gómez Farías</b>	1	2	2	1	6	1.50	0.0561	0.58
<b>Boulevard PA</b>	2	7	4	3	16	4.00	0.1495	2.16
<b>Balbuena</b>	3	0	0	1	4	1.00	0.0374	1.41
<b>Moctezuma</b>	4	0	2	0	6	1.50	0.0561	1.91
<b>San Lázaro</b>	5	3	2	4	14	3.50	0.1308	1.29
<b>Candelaria</b>	0	0	0	0	0	0.00	0.0000	0.00
<b>Merced</b>	0	0	0	0	0	0.00	0.0000	0.00
<b>Pino Suárez</b>	3	2	4	0	9	2.25	0.0841	1.71
<b>Isabel la Católica</b>	2	0	3	1	6	1.50	0.0561	1.29
<b>Salto del Agua</b>	1	1	1	0	3	0.75	0.0280	0.50
<b>Balderas</b>	1	0	5	5	11	2.75	0.1028	2.63
<b>Cuauhtémoc</b>	1	2	3	0	6	1.50	0.0561	1.29
<b>Insurgentes</b>	1	3	0	0	4	1.00	0.0374	1.41
<b>Sevilla</b>	0	0	0	1	1	0.25	0.0093	0.50
<b>Chapultepec</b>	5	2	1	0	8	2.00	0.0748	2.16
<b>Juanacatlán</b>	0	0	1	0	1	0.25	0.0093	0.50
<b>Tacubaya</b>	0	1	0	0	1	0.25	0.0093	0.50
<b>Observatorio</b>	0	0	0	0	0	0.00	0.0000	0.00
<b>Totales</b>					<b>107</b>	<b>26.75</b>	<b>1.00</b>	

Tabla 2.6. Probabilidades de llegada con un flujo de pasajeros “moderado”.  
El 43% de ocasiones no hubo proceso de ascenso.

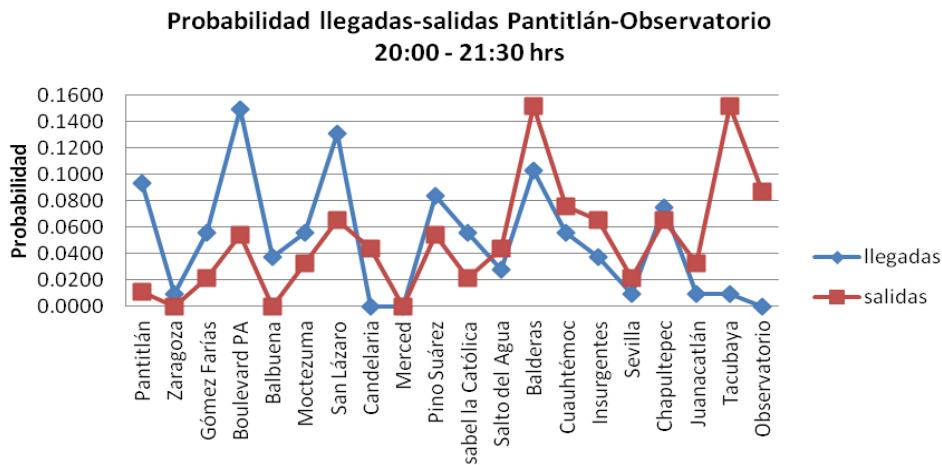
Pasajeros que bajan por estación 20:00 - 21:30 pm								
Estación	20:20 V39	20:20 V42	20:41 V50	20:41 V54	Suma	Promedio	Probabilidad Salida	Desviación Estándar
Pantitlán	0	1	0	0	1	0.25	0.0109	0.50
Zaragoza	0	0	0	0	0	0.00	0.0000	0.00
Gómez Farías	1	1	0	0	2	0.50	0.0217	0.58
Boulevard PA	1	0	2	2	5	1.25	0.0543	0.96
Balbuena	0	0	0	0	0	0.00	0.0000	0.00
Moctezuma	0	1	1	1	3	0.75	0.0326	0.50
San Lázaro	1	1	1	3	6	1.50	0.0652	1.00
Candelaria	0	0	1	3	4	1.00	0.0435	1.41
Merced	0	0	0	0	0	0.00	0.0000	0.00
Pino Suárez	2	0	1	2	5	1.25	0.0543	0.96
Isabel la Católica	0	1	1	0	2	0.50	0.0217	0.58
Salto del Agua	1	2	1	0	4	1.00	0.0435	0.82
Balderas	2	3	8	1	14	3.50	0.1522	3.11
Cuauhtémoc	1	0	1	5	7	1.75	0.0761	2.22
Insurgentes	1	2	2	1	6	1.50	0.0652	0.58
Sevilla	1	0	1	0	2	0.50	0.0217	0.58
Chapultepec	3	2	0	1	6	1.50	0.0652	1.29
Juanacatlán	1	1	1	0	3	0.75	0.0326	0.50
Tacubaya	4	4	5	1	14	3.50	0.1522	1.73
Observatorio	2	3	2	1	8	2.00	0.0870	0.82
<b>Totales</b>					<b>92</b>	<b>23.00</b>	<b>1.00</b>	

Tabla 2.7. Probabilidades de salidas con flujo de pasajeros “moderado”. El 35% de ocasiones no hubo proceso de descenso.

La Gráfica 2.10 muestra una dinámica muy moderada en el flujo de pasajeros, el 43% de las ocasiones no subió ningún pasajero al vagón y el 35% no bajó ningún pasajero. Esto indica que las llegadas y salidas tienen índices muy bajos, mientras que en la otra dirección se desarrollan dinámicas saturadas. Se puede observar que el segmento de Pantitlán a Isabel la Católica la probabilidad de llegada es mayor que la salida, a excepción de Candelaria, posteriormente de Salto del Agua a Observatorio

## Capítulo 2

la probabilidad de salida es mayor que la de llegadas, a excepción de Chapultepec.



Gráfica 2.10. Probabilidades de llegadas y salidas en flujo moderado.

Con las distribuciones de probabilidad se pueden hacer estrategias de regulación que convengan a las dos direcciones. En horas picos se tiene una dirección saturada, ya sea Pantitlán-Observatorio (mañana) o Observatorio-Pantitlán (noche) y la otra dirección se encuentra descargada y relajada pero con la tendencia de flujo de pasajeros contrario (como se observa en la Gráfica 2.9 y 2.10).

Las estrategias de tren en vacío puede ayudar a mejorar el rendimiento de la línea, por ejemplo, en el informe quincenal anterior analizamos el tiempo de ascenso en terminales y obtuvimos tiempos de ascenso de casi 2 pasajeros por segundo, si se emplea el tren en vacío intercalándolo en las estaciones Pantitlán, Zaragoza durante las horas pico de la mañana, los tiempos generales del recorrido podrían mejorar porque ya no llegaría saturado al 40%, llegaría a la mitad. Esto se podría hacer periódicamente en los “picos de llegadas” de la función de probabilidad.

Como trabajo futuro está el ajuste de estas distribuciones de probabilidad en ambas direcciones y a lo largo de todo el día. Se tendría una función de probabilidad que cambiaría en el tiempo respecto a la afluencia de pasajeros y la hora.

# **Capítulo 3**

## **Patrones de comportamiento de los pasajeros**

La conducta del usuario de los Sistemas de Transporte Público (STP), como el Metro de la Ciudad de México, se rige por la saturación de pasajeros que pueda haber en ese momento.

Se plantea en este proyecto que los pasajeros tratan de optimizar dos aspectos importantes, el tiempo de viaje y su comodidad. En altas saturaciones la comodidad pasa a segundo término, mientras que en poca saturación le da más importancia a su comodidad. La búsqueda de patrones y análisis de los comportamientos de los pasajeros complementa la información recabada de las tablas características.

Las conductas de los pasajeros pueden ser muy diversas, el análisis de los videos pueden ayudar a entender su comportamiento e identificar varios perfiles de pasajeros. Existen casos comunes de conductas, por ejemplo, la obstrucción de zonas de puertas o la separación de pasajeros en densidades bajas. Por el modo en el que se comportan se pueden identificar como pasajeros “egoístas” y pasajeros “cooperativos”; los egoístas principalmente obstruyen los accesos y son un poco más rígidos en sus desplazamientos, los cooperativos, buscan posiciones donde obstruyan lo menos posible y es más

## Capítulo 3

frecuente que cambien de posiciones, puede existir una gama completa entre éstas dos posturas.

Por otro lado existen casos extraordinarios de conductas, por ejemplo, fricciones entre pasajeros, golpes, acosos y empujones. Estas observaciones junto con las tablas características generan un perfil de la línea y de los pasajeros.

Se observaron cuatro reglas básicas de comportamiento entre los pasajeros.

### 3.1 Evasión

Los pasajeros buscan estar lo más separados posible, mientras menos saturado este el vagón, más separados desean estar el uno del otro. Si la densidad de pasajeros es alta seguramente utilizará alguna estrategia que le haya funcionado en el pasado, su movilidad se ve restringida y también sus opciones de comodidad, sin embargo, si la densidad es baja, su movilidad puede ser libre y tiene un mayor opciones de comodidad.



Imagen 3.1. Ascenso en la terminal Pantitlán a las 8:41 p.m. Existe una densidad baja de pasajeros, hay múltiples opciones para viajar cómodo, una pasajera decide viajar parada durante 3 estaciones.



Imagen 3.2. Ascenso en la terminal Pantitlán a las 7:59 a.m. Existe una densidad alta de pasajeros, se restringen las opciones para viajar cómodo, al mismo tiempo no desean esperar otro tren.



Imagen 3.3 Se llega al punto de saturación en el cual se pierde toda opción de movilidad, ya no hay comodidad.



Imagen 3.4. Una gran saturación, no hay espacio para abordar.

En la Imagen 3.1 y 3.2 se comparan las posibilidades de movilidad en el interior del vagón, se despejan las zonas centrales debido a que no es una zona cómoda, no hay forma de agarrarse de algún tubo. En estas densidades es cuando surgen las posiciones preferenciales como los asientos y los tubos de las zonas de las puertas, no importando si es entrada o no. Cuando hay poca afluencia el tiempo de viaje está dado por el funcionamiento de la infraestructura, el usuario deja en segundo plano la optimización del tiempo de viaje.

Cuando hay máxima saturación como en la Imagen 3.3 y 3.4 la comodidad toma un segundo plano y el pasajero se concentra en optimizar su tiempo de viaje. En este régimen de la dinámica el usuario si tiene una influencia directa en el tiempo de viaje, dependiendo de su estrategia puede o no retrasar el tren, existen dos casos, que esperen en la plataforma un tren menos saturado para abordar o que hagan lo posible por entrar con el riesgo de obstruir las puertas y poner en riesgo su seguridad. La vivencia en este régimen de la dinámicas se puede relacionar con ganar y perder, si el pasajero no sube al metro tiene la noción de *pérdida* de tiempo, si sube al metro en circunstancias de saturación tiene la noción de *ganancia* de tiempo de viaje en relación a los que están a su alrededor. Incluso entra un componente de imitación con el siguiente argumento *si el otro está subiendo yo por que no*. En estos casos la percepción de la gente impacta directamente el funcionamiento del metro.

### 3.2 Campo de visión

Cuando existe saturación en el interior del vagón, los usuarios mantienen una alineación de su campo de visión por zonas, debido a que no quieren encontrar su campo de visión con otra persona, es decir, quedar frente a frente.



Imagen 3.5. Las flechas indican la dirección aproximada del centro de su campo de visión, son pocos los casos en los que se encuentran estos vectores, es decir quedan frente a frente.



Imagen 3.6. Las flechas quedan orientadas por zonas, en otros casos toman otras direcciones pero muy pocas veces se encuentran frente a frente.

Las imágenes anteriores muestran que es difícil que el campo de visión, representado por una flecha o vector, quede encontrado con algún otro vector, los pasajeros tratan de alinearse en dirección con los demás para evitar encontrarse. En la Imagen 3.5 la persona marcada con letra “A” trató de evadir en todo momento el encuentro con la persona de enfrente. En la Imagen 3.7 y 3.8 se muestran grupos donde los vectores se encuentran.



Imagen 3.7. Las conversaciones entre las personas del grupo hacen que los vectores se encuentren.



Imagen 3.8. Otro ejemplo de vectores que se encuentren.

### 3.3 Zonas preferenciales.

Los pasajeros tienen formas particulares de ocupar los espacios del vagón, en ascensos de terminales los pasajeros desean estar lo más alejado posible de los demás, esto hace que se forme una distribución homogénea de lugares ocupados. Dependiendo de la afluencia, esta comodidad de aislamiento puede durar muy pocas estaciones .En la Imagen 3.1 de la primera sección se puede observar la distribución casi homogénea de los pasajeros. También muestra que hay pasajeros que prefieren viajar en la zona de las puertas.



Imagen 3.9. Ascenso en la terminal Observatorio, inmediatamente se ocupan las zonas de las puertas. Los pasajeros que se posicionan en esta zona obstruyen la entrada y salida.



Imagen 3.10. Se muestran los usuarios etiquetados como A, B, C y D en zonas de puertas. Es común encontrar estos espacios ocupados incluso cuando hay espacio en asientos y pasillo.

Las zonas menos preferentes son las que están en el área central en la zona de puertas, esto es debido a que no hay sostén de algún tipo.



Imagen 3.11. Zonas centrales sin ocuparse



Imagen 3.12. Al no poder ocupar la zona central los pasajeros tienden a orillarse.

## Capítulo 3

En la Imagen 3.11 y 3.12 muestra que las zonas centrales no son utilizadas hasta una densidad crítica, al no haber medios de soporte (tubos) trae como consecuencia que los pasajeros tiendan a orillarse, es discutible si esta es la razón por la que obstruyen las puertas o simplemente es la costumbre.

### 3.4 Modelo de vectores de preferencias

Dentro del vagón existen muchas posiciones que puede conseguir el pasajero, las opciones se restringen dependiendo del grado de saturación de pasajeros, por ejemplo, la región que se satura primero son los asientos y donde hay poca gente es en los pasillos Además de los asientos existen otros lugares cómodos y otros no tan cómodos. En la Tabla 3.1 se hace una caracterización de las regiones del vagón. La comodidad en estas regiones dependen de la percepción de cada pasajero, aún así, se le puede agregar un valor de “comodidad” a cada región a partir del grado de saturación del vagón; por ejemplo, si está vacío los asientos se convierten en la mejor opción, pero si está saturado el vagón, la mejor opción podría ser el área “EP” (esquina-puerta). La región menos favorable es la “C” (centro) porque carece de pasamanos y soporte para el pasajero, esta región es la que se ocupa cuando ya no hay más opciones.

El grado de comodidad es un valor que nos indica la preferencia del pasajero para ocupar ese lugar, cuando no está saturado el vagón los asientos tiene el valor máximo 5, después la región “EP” (esquina-puerta) con un valor de 4, después las regiones “F” (fondo) y “ET” (esquina-tubo) con un valor de 3 ya que el pasajero va parado pero tiene soporte por los tubos principales, después las regiones “L” y “P” con un valor de 2; y al final “C” con un valor de 1 ya que carece de soporte para el pasajero.

Para propósitos de la simulación computacional esto ayudará a localizar a los pasajeros. Además se podrán formar listas de prioridades según el perfil de usuario. Por ejemplo, hay usuarios que prefieren viajar parados en la región “EP” (esquina-puerta) aún y cuando hayan asientos desocupados, hay otros que prefieren sentarse incluso se cambian de sección para encontrar comodidad, hay otros que prefieren viajar en las regiones de “3A” (3-asientos) y otros que prefieren la región “1A” (1-asientos), y como último ejemplo, es muy poco probable observar a usuarios que viajan en pasillo con

## Patrones de comportamiento de los pasajeros

poca saturación en el vagón; esto muestra que hay una gran diversidad de comportamientos pero en los sistemas de transporte público el pasajero se tiene que adaptar a las opciones que existen en ese momento, es cuando surge la necesidad de usar estrategias.

Descripción de regiones en el vagón						
id	Región	Descripción	Número de regiones	Capacidad de personas (estimado)	Grado de comodidad (tren no saturado)	Grado de comodidad (tren saturado)
3A	3-asientos	Son los 3 asientos que se encuentran agrupados en forma de escuadra	2	6	5	4
1A	1-asiento	Son los asientos que se encuentran en los extremos del vagón	2	2	5	4
EP	esquina-puerta	Son los lugares que se encuentran en las esquinas de las puertas	4	4	4	5
F	fondo	Es la región entre los 1-asientos	1	2	3	3
ET	esquina-tubo	Son las regiones que se encuentran alrededor de los tubos principales entre el pasillo, la zona de puertas y el área central	4	12	3	3
P	puertas	Es la región que se encuentra entre las esquinas-puerta	2	2	2	3
L	pasillo	Es la región que se encuentra entre los 3-asientos y conecta las diferentes zonas	1	3	2	2
C	centro	Es la región central entre las puertas y los pasillos	1	14	1	1
V	vacía	Es la región entre los 3-asientos y los 1-asientos donde se encuentran las piernas de los pasajeros	4	0	0	0
Total			45			

**Tabla 3.1. Asignación de identificadores a las distintas regiones del vagón.**

Para identificar de mejor manera las regiones propuestas en la Tabla 3.1 se muestra en la Figura 3.1 un mapa de las diferentes regiones y en la Figura 3.2 como se podrían distribuir los usuarios en una situación de máxima saturación.

## Capítulo 3

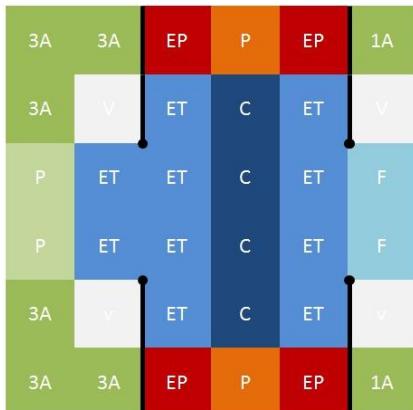


Figura 3.1. Mapa para identificar las posiciones de los pasajeros. Las regiones en rojo y naranja indican la zona de puertas, los pasamanos están en color negro y los lugares vacíos en gris claro.

Las regiones que prefieren los usuarios en promedio son los asientos marcados con “3A” y “1A” y las esquinas de las puertas marcas con “EP” (esquina-puerta), después está la región marcada como “ET” (esquina-tubo) y las zonas “F” (fondo) y “L” (pasillo), la región “P” ubicada en medio de las puertas y la región “C” (central) son las menos preferidas por que no tiene soporte.

A partir de los videos se pueden crear una descripción de la dinámica de pasajeros en los procesos de ascenso-descenso y permanencia en el vagón. En la Tabla 3.2, se muestra el pseudocódigo que describe la preferencia de lugares en el proceso de ascenso con una distribución como la mostrada en la Figura 3.1

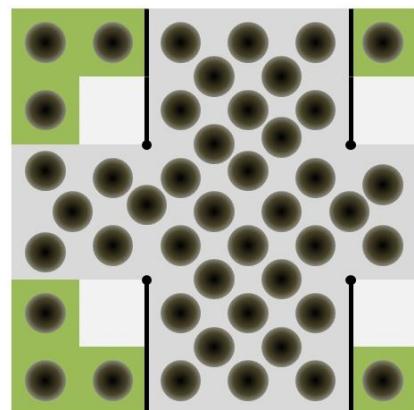


Figura 3.2. Posible distribución de pasajeros en una situación máxima. 45 pasajeros por zona “A” o zona “D”.

1. **IF** tren completamente vacío
2.     **IF** pasajero entra por el lado izquierdo
3.         El pasajero busca las regiones “3A” y se sienta en cualquier lugar
4.     **ELSE** pasajero entra por el lado derecho
5.         El pasajero busca las regiones “1A” y se sienta en cualquier lugar
6. **ELSE**
7.     **IF** tren tiene pasajeros y entro por el lado izquierdo
8.         **IF** la región “3A” (3-asientos) tiene asientos desocupados
9.             El pasajero se sienta
10.      **ELSE** la región “3A” (3-asientos) está ocupada
11.         **IF** la región “EP” (esquina-puerta) está desocupada
12.             El pasajero se establece
13.      **ELSE** la región “EP” (esquina-puerta) está ocupada
14.         **IF** la región “ET” (esquina-tubo) está desocupada
15.             El pasajero se establece
16.      **ELSE** la región “ET” (esquina-tubo) está ocupada
17.         **IF** la región “L” (pasillo) está desocupada
18.             El pasajero se establece
19.      **ELSE** la región “L” (pasillo) está ocupada
20.         **IF** la región “C” (centro) está desocupada
21.             El pasajero se establece
22.      **ELSE** la región “C” (centro) está ocupada
23.         **IF** la región “P” está desocupada
24.             El pasajero se establece
25.      **ELSE** la región “P” está ocupada
26.             El pasajero no puede abordar
27. **ELSE** tren tiene pasajeros y entro por el lado derecho
28.         **IF** la región “1A” (1-asientos) tiene asientos desocupados
29.             El pasajero se sienta
30.      **ELSE** la región “1A” (1-asientos) está ocupada
31.         **IF** la región “EP” (esquina-puerta) está desocupada
32.             El pasajero se establece
33.      **ELSE** la región “EP” (esquina-puerta) está ocupada
34.         **IF** la región “ET” (esquina-tubo) está desocupada
35.             El pasajero se establece
36.      **ELSE** la región “ET” (esquina-tubo) está ocupada
37.         **IF** la región “F” (fondo) está desocupada

## Capítulo 3

38.	El pasajero se establece
39.	<b>ELSE</b> la región “F” (fondo) está ocupada
40.	<b>IF</b> la región “C” (centro) está desocupada
41.	El pasajero se establece
42.	<b>ELSE</b> la región “C” (centro) está ocupada
43.	<b>IF</b> la región “P” está desocupada
44.	El pasajero se establece
45.	<b>ELSE</b> la región “P” está ocupada
46.	El pasajero no puede abordar

Tabla 3.2 Pseudocódigo de la dinámica estándar de pasajero cuando entra por la izquierda o derecha de la puerta del vagón

El pseudocódigo muestra la dinámica que ejecuta un pasajero en un ascenso normal para escoger su región más cómoda. Cada usuario puede tener un mecanismo parecido al de la Tabla 3.2 pero con su propia elección de jerarquías.

Para el pasajero que se ajuste al pseudocódigo de la Tabla 3.2, sus preferencias quedan descritas por el siguiente vector entrando por la derecha:

$$\text{PasajeroK}_{\text{der}} = \{ 3A, EP, ET, L, C, P \}$$

Si entra por la izquierda:

$$\text{PasajeroK}_{\text{izq}} = \{ 1A, EP, ET, F, C, P \}$$

Cada usuario podría definir su propia estrategia por ejemplo

$$\text{Pasajero1}_{\text{der}} = \{ EP, ET, C \}$$

$$\text{Pasajero1}_{\text{izq}} = \{ EP, ET, C \}$$

Es decir es un pasajero que no importa la saturación del vagón, no se sentará y sé que dará preferentemente en las esquinas de las puertas los tubos o el área central. Posiblemente quiera bajar en la siguiente parada.

De esta manera podemos dar toda una gama de estrategias para explicar los distintos comportamientos. Para fines de una simulación computacional se asignaría una estrategia estándar y posteriormente se podría hacer combinaciones de estas.

### 3.5 Caso específico

Se han mostrado algunos patrones de comportamiento que surgen en los vagones, son conductas promedio que prevalecen en la dinámica y que hay posibilidad de caracterizarla de forma computacional. Existen casos un poco más aislados como las fricciones que surgen entre los pasajeros como riñas, golpes y acosos. Se han registrado en las grabaciones este tipo de eventos que no son propiamente de la dinámica pero que se tienen que considerar, este tipo de casos muestra que el sistema presenta una gran fricción, hay ruido y puede resultar impredecible.

Dentro del proceso de videogramación se han encontrado casos particulares de conductas agresivas, golpes y acoso por parte de los usuarios. Estos casos no se consideran parte de la dinámica normal pero reflejan la tensión que existe, la falta de reglas y mecanismos de regulación.

En la Imagen 3.13 se muestra el vagón con una gran saturación, dos personas marcadas como A y B, donde la conducta de A es castigada por B a través de un golpe, no está claro el motivo para que B reaccionara de esa forma pero la suposición esta en el sentido de que si A no hubiera violado alguna regla lo más natural hubiera sido encarar a B, pero no lo hizo.

## Capítulo 3



Imagen 3.13. Caso específico de agresión.

Es interesante observar que el entorno percibió el golpe por el sonido y el movimiento, pero no hubo interacción alguna con A o con B. En este sistema hay una gran contención de información y muy poca interacción entre pasajeros, más allá de los vecinos inmediatos no hubo señal de lo que sucedió.



Imagen 3.14. Contensión del entorno. Las flechas indican la dirección del campo de visión, todo el entorno apunta a los usuarios “A” y “B” pero no hay interacción hacia ellos.

# **Capítulo 4**

## **Ascenso y descenso de pasajeros en vagones**

Los Sistemas de Transporte Público (STP) están constituidos por un gran número de componentes, en el cual se puede identificar una parte imprescindible, la relación usuario-infraestructura. El correcto funcionamiento y el buen desempeño de los STP dependen de esta relación ya que las decisiones de los usuarios impactan directamente en el manejo de la infraestructura. Mientras más informados estén los usuarios, el sistema podrá tener un mejor desempeño, ya que utilizarán correctamente los servicios ofrecidos.

El proceso de ascenso y descenso de pasajeros es una parte fundamental para el buen funcionamiento de la línea, ya que se puede convertir en una fuente significativa de retrasos. El proceso está regulado por los tiempos de permanencia del tren en la estación, es decir, mientras esté el tren en la estación con las puertas abiertas, los usuarios pueden subir o bajar; como una de las aportaciones principales se propone el *tiempo efectivo de ascenso y descenso* que representa el tiempo exacto invertido por los pasajeros en subir y bajar del tren, comparado con el tiempo de puertas abiertas este puede ser menor o igual.

## Capítulo 4

El proceso que se está estudiando comprende el ascenso, descenso y permanencia en el vagón de los pasajeros, se puede describir en las siguientes cinco etapas:

1. **La acumulación de pasajeros en la plataforma antes de la llegada del tren.** La distribución de los pasajeros está ligada a la geometría del espacio; por ejemplo, donde se encuentran las salidas, entradas, tamaño de la plataforma y señalamientos.
2. **El proceso de descenso antes de la llegada del tren a la plataforma.** Los pasajeros que bajan en la estación se van acercando a las puertas para preparar su descenso, dependiendo de la densidad de pasajeros dentro del vagón puede haber reacomodos y negociación.
3. **El proceso de ascenso y descenso a la plataforma.** La rapidez con que se lleven a cabo estos procesos depende de la organización de los pasajeros, actualmente existe la estrategia “antes de entrar permita salir” que trata de regular los flujos de entrada y salida.
4. **El reacomodo de los pasajeros en el vagón.** Los nuevos pasajeros en el vagón buscan lugares adecuados a sus necesidades, que se van restringiendo mientras la densidad de pasajeros es más grande.
5. **La salida de los pasajeros en la plataforma.** Al descender del vagón el pasajero busca su salida más próxima, se forman flujos de pasajeros hacia las salidas encontrando pasajeros estacionados que puede obstruir el flujo.

Los puntos 1 y 5 se desarrollan en la plataforma mientras que los puntos 2, 3, y 4 suceden en el vagón.

En horas pico tanto las densidades de pasajeros para subir al vagón y para bajar son altas, sin embargo, existen varios casos a considerar. A continuación, se hace un análisis de los posibles casos considerando distintas densidades de pasajeros.

## 4.1 Casos de densidades en el proceso de ascenso-descenso

Existen muchos casos a considerar para un análisis del flujo de pasajeros, depende principalmente de la densidad de pasajeros tanto en plataforma como en el vagón y de la cantidad de pasajeros que bajan y suben en el mismo evento. Si se toman estas cuatro variables, densidad del vagón, densidad de la plataforma, pasajeros que bajan y pasajeros que suben; y los valores que pueden tomar son, densidad alta y densidad baja, entonces se está tratando  $2^4$  posibles combinaciones.

Si se toman todas estas posibles combinaciones generamos 16 casos de los cuales 6 son válidos. En el Cuadro 4.1 mostramos todas las dinámicas y una breve descripción. Las variables “alto” y “bajo” son relativas, las denotamos como 1, “alto”, y 0, “bajo”. Un ascenso “alto” puede ser considerado de 6 pasajeros en adelante y lo contrario para “bajo”, menor a 6 pasajeros; esta medida la determinamos por medio de muestreos en la plataforma.

Los cuadros en rojo muestran una posible contradicción en la dinámica, por ejemplo, poca gente en la plataforma y ascensos altos, no es posible, aunque hay casos un poco más complicados como el caso 3 del Cuadro 4.1 donde el vagón está saturado, la plataforma está saturada, con descenso alto y ascenso bajo, ¿por qué no es posible? Aunque el vagón tenga una saturación excesiva, al menos el número de pasajeros que bajó (descenso alto) subirá, en otras palabras, como consecuencia de un descenso alto es un ascenso alto en plataforma saturada, además es común observar que debido a la conducta de los usuarios del metro, aún y cuando este saturado el vagón, los usuarios hacen todo lo posible por subir, por consiguiente el caso 3, mucha gente en la plataforma y con un ascenso bajo es una situación que en la Ciudad de México no podría existir. Los casos posibles y que se tienen que considerar para estudio son el 1, 2, 7, 8, 10 y 16.

Como se observa, el caso 1 y 2 son posibles y son los eventos más conflictivos, es decir, el vagón está saturado, la plataforma está saturada y desean subir y bajar muchas personas, o en su defecto solo subir.

El caso 7 y 10 corresponden a dinámicas tipo terminal de inicio y de final, es decir, ascensos muy grandes en trenes semi-vacíos y descensos muy

## Capítulo 4

grandes en plataformas despejadas. En el caso 8 el vagón está saturado, pero no hay intercambio, mientras que en el caso 16 el vagón va vacío y hay muy poca gente para subir o bajar.

Posibles combinaciones de las dinámicas de pasajeros						
	Desidad pasajeros		Flujo pasajeros			
Caso	Vagón	Plataforma	Ascenso	Descenso	¿es posible?	Observación
1	1	1	1	1	Si	Saturación de pasajeros e intercambio de pasajeros alto, lo usual en estaciones conflictivas.
2	1	1	1	0	Si	Saturación en la línea pero bajan pocos pasajeros.
3	1	1	0	1	NO	Si la plataforma esta saturada al menos sube la cantidad de pasajeros que bajo, el caso es posible siempre y cuando la gente no quiera subir por comodidad, en la Ciudad de México no se da el caso
4	1	1	0	0	NO	Mismo caso que el anterior, los pasajeros de la plataforma no se detendrán aunque este saturado.
5	1	0	1	1	NO	La plataforma tiene una densidad baja entonces no puede haber ascenso altos.
6	1	0	1	0	NO	La plataforma tiene una densidad baja entonces no puede haber ascenso altos.
7	1	0	0	1	Si	El vagón saturado y baja mucha gente en plataforma relajada
8	1	0	0	0	Si	El vagón esta saturado pero hay poco intercambio.
9	0	1	1	1	NO	El vagón tiene una densidad baja de pasajeros no pueden haber descensos altos.
10	0	1	1	0	Si	El vagón tiene un densidad baja de pasajeros y suben muchos de la plataforma
11	0	1	0	1	NO	El vagón tiene una densidad baja no pueden haber descensos alto
12	0	1	0	0	NO	Si la plataforma esta saturada y el vagón esta poco lleno, entonces lo normal es que todos los pasajeros suban.
13	0	0	1	1	NO	No pueden haber descenso y ascensos altos si no hay un número alto de pasajeros en el sistema
14	0	0	1	0	NO	Si la plataforma tiene una densidad de pasajeros baja no puede haber descensos altos.
15	0	0	0	1	NO	Si el vagón tiene un densidad baja de pasajeros no pude haber descensos altos.
16	0	0	0	0	Si	Saturación baja en todo el sistema

Cuadro 4.1. Posibles dinámicas de los pasajeros a partir de la densidad en vagón y plataforma.

Falta un componente más para explicar y entender el proceso de ascenso y descenso, la *dinámica de ascenso y descenso*, ¿cómo los pasajeros se organizan para subir y para bajar?, o si lo hacen de manera desorganizada, si existen estrategias individuales o colectivas, si hay cooperación y comunicación entre ellos. A continuación se presentarán tres casos representativos del proceso de ascenso-descenso con distintos grados de saturación donde se observa cierta organización de los usuarios para entrar y salir. En general se observa la formación de flujos de salida y de entrada de manera espontánea y sin coordinación alguna.

## 4.2 Análisis de la formación de flujos en el proceso de ascenso-descenso

Algunas de las estrategias de los pasajeros para subir y bajar es la creación de flujos de manera no coordinada; es decir, no hay un acuerdo entre ellos. Por lo general la formación del flujo inicia cuando un pasajero abre camino entre los demás para llegar a su destino, ya sea para subir o bajar del vagón, los siguientes pasajeros los siguen por detrás para disminuir la fricción, de esta manera se aprovecha el espacio liberado de los pasajeros que van abriendo camino. Estos flujos existen sólo unos cuantos segundos, si los pasajeros no se incluyen o fomentan estos flujos de entrada o de salida será muy difícil que suban o que bajen del vagón cuando hay saturación.

En la Figura 4.1 se representa esquemáticamente la dirección que pueden tener estos flujos de pasajeros de manera abstracta, ya que las trayectorias de los pasajeros son mucho más irregulares e intrincadas. En (a) y (b) existe un solo flujo de salida o de entrada respectivamente, en (c) pueden existir los dos, ya sea que el de salida sea el del lado izquierdo o viceversa; y en (d) existen tres flujos, dos laterales para entrar y uno central para salir.

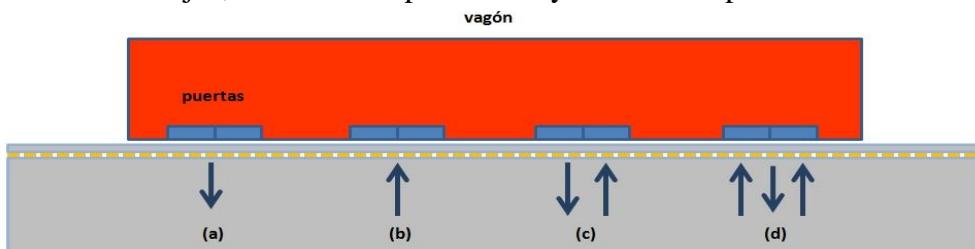


Figura 4.1. Dirección de los flujos en el proceso de ascenso y descenso

## Capítulo 4

Estos flujos pueden coexistir unos cuantos segundos ya que en el metro de la Ciudad de México los tiempos del *proceso de ascenso* no pueden ser separados totalmente del tiempo del *proceso de descenso* debido a la falta de regulación. Los pasajeros que se encuentran en la plataforma presionan antes de tiempo y empiezan a subir antes de que todos los pasajeros del vagón hayan bajado. Cuando hay algún grado de saturación, conjunto con la falta de regulación y la conducta de la gente, genera que haya mucha fricción en este proceso.

En la siguiente sección se analiza el comportamiento de flujo de pasajeros de los casos 3, 10 y 16 del Cuadro 4.1.

### **4.3. Análisis de casos específicos.**

#### **Caso 3. Saturación alta de vagón, saturación alta de la plataforma con ascensos y descensos grandes**

En este caso hay una gran saturación tanto en el vagón como en la plataforma, además se presentan ascensos y descensos grandes. Las estaciones donde se pueden encontrar estas dinámicas son Pino Suárez, Salto del Agua, Balderas e Insurgentes por la mañana en horarios de 7:30 a 9:00 am. En la secuencia de Imágenes 4.1 a 4.5 se muestra la evolución del ascenso-descenso. Un comportamiento típico es que los pasajeros de la plataforma dejan muy poco espacio para permitir el descenso, al llegar el tren ya están esperando la apertura de puertas sin considerar a la gente que bajará.<sup>7</sup> Los primeros pasajeros que pretenden bajar hacen espacio entre la multitud y se genera una sola fila en medio de la puerta para salir, los usuarios siguientes que desean bajar deben seguir este “camino provisional” de lo contrario no podrán descender del vagón.

---

<sup>7</sup> Se deben proponer mecanismo de regulación para atender este problema.

## Ascenso y descenso de pasajeros



Imagen 4.1. Video 15, estación Balderas, tiempo de viaje: 28:38 min.

En la Imagen 4.1 se muestra con las etiquetas B1 a B5 los usuarios que están en el proceso de descenso, se observa que se genera este “camino provisional” que tienen que seguir los usuarios, simultáneamente quieren subir los usuarios de la plataforma pero como está totalmente saturado deben esperar (aunque no quieran) para que se libere un poco de espacio en el vagón.



Imagen 4.2. Video 15, tiempo de viaje: 28:41 min.

En la Imagen 4.2, la persona etiquetada como B5 es la última que se encontraba en el “camino provisional” (Imagen 2.5), le cuesta mucho trabajo bajar ya que los pasajeros que quieren subir empiezan a saturar la entrada. Simultáneamente el pasajero S1 sube y el pasajero B5 baja. El pasajero B6 también desea bajar pero se encontraba muy atrás y no fue

## Capítulo 4

beneficiado con el “camino provisional” que formaron los otros pasajeros (de B1 hasta B5). Se puede observar como los pasajeros O1 y O2 obstruyen las puertas, esto hace que todavía se dificulte más el proceso de ascenso-descenso.



Imagen 4.3. Video 15, tiempo de viaje: 28:42 min.

En la Imagen 4.3, un segundo después, el pasajero B6 ya no alcanza a salir y prácticamente se topa con el cúmulo de personas que se disponen a entrar a base de empujones. El pasajero O1 sigue obstruyendo la entrada pero poco a poco va siendo desplazado a la parte de atrás. El pasajero O2 no lo mueven por que está afianzado al tubo de la puerta, lo mismo pasa con el pasajero O3.



Imagen 4.4. Video 15, tiempo de viaje: 28:45 min.

En la Imagen 4.4, tres segundos después, los pasajeros que suben empiezan a comprimir a la gente del interior del vagón, el pasajero O1 que se encontraba obstruyendo la entrada está totalmente desplazado de la entrada, el pasajero B6 se encuentra atascado entre los que entran y ya no podrá salir. Al pasajero O2 lo aprietan contra los pasamanos.



Imagen 4.5. Video 15, tiempo de viaje: 28:56 min.

Este evento de ascenso-descenso duro 23 segundos, bajaron 5 pasajeros, subieron 7, un pasajero no pudo bajar y hubo mucha fricción. En la región de grabación se encuentran aproximadamente 50-52 pasajeros, esta cantidad se considera como el límite máximo de pasajeros en la región “A” o “D” del vagón.

Esta secuencia de imágenes muestra lo complicado que puede ser el proceso de ascenso-descenso cuando no hay algún método de regulación, los pasajeros hacen todo lo posible por subir apretando y empujando a todos los demás. Bajo estas circunstancias y como se ha analizado en otros videos, lo mejor es cerrar la puerta del tren ya que los pasajeros no dejan de intentar subir al vagón. En la Imagen 4.5 se observa un pasajero con las manos hacia arriba apoyándose en la estructura del vagón para entrar, al cerrarse las puertas, estas le dieron un golpe en la espalda, este tipo de usuario ponen en riesgo su integridad en primer lugar y en segundo lugar obstruyen las puertas generando retrasos y percances.

## Caso 10. Saturación baja de vagón y alta de plataforma con ascensos grandes

Este caso fue tomado del Video 51 el cual representa una carrera con dirección Observatorio-Pantitlán a las 9:20 pm en la estación Tacubaya. A diferencia del Caso 3 el número de personas que bajan y suben son algo parecidos pero el entorno está mucho menos saturado. En la siguiente secuencia de Imágenes de 4.6 a 4.9 se muestra la evolución del ascenso-descenso.



Imagen 4.6. Video 51, estación Tacubaya, tiempo de viaje: 03:07 min.

La Imagen 4.6 muestra un vagón semivacío, los pasajeros preparan su descenso, hay una plataforma medianamente saturada donde los pasajeros esperan para subir. Bajan 5 pasajeros y se forma el “camino provisional” a través de la gente como en el caso anterior, los pasajeros bajan uno detrás de otro para conservar el camino, lo hacen de forma rápida ya que es la oportunidad para bajar con la menor fricción posible.

## Ascenso y descenso de pasajeros



Imagen 4.7. Video 51, tiempo de viaje: 03:09 min.

En la Imagen 4.7 se establece un flujo de descenso que la mayoría de los casos se realiza en la parte de en medio de la puerta, por los extremos se generan dos flujos de ascenso siempre y cuando no haya pasajeros que obstruyan la entrada. El flujo de ascenso etiquetado como 1 se realiza simultáneamente con el flujo de descenso, también inicia el flujo de ascenso etiquetado como 2 en el otro extremo de la puerta. Este evento tuvo la combinación ideal de pasajeros y espacio disponible para que se formaran los flujos, poca gente que baja, vagón vacío y mucha gente que desea subir.



Imagen 4.8. Hora de viaje: 03:11 min.

En la Imagen 4.8, el flujo de descenso prácticamente se termina y los dos flujos de ascenso en los extremos de la puerta se establecen.



Imagen 4.9. Hora de viaje: 03:14 min.

En la Imagen 4.9 se establece el flujo general de ascenso, todos los pasajeros pueden subir sin interferencias. Este evento duro 19 segundos con las puertas abiertas, bajaron 5 pasajeros y subieron 12, en total fueron 17 pasajeros en el proceso de ascenso-descenso. Las puertas permanecieron abiertas 5 segundos más después de que subió el último pasajero del primer cúmulo, no subió nadie más.

### Caso 16. Saturación baja de vagón y baja de plataforma con ascensos-descensos bajos.

Este caso muestra como también en pequeñas cantidades de pasajeros los flujos se forman de manera lateral para subir y de manera central para bajar. En la Imagen 4.10 el pasajero marcado como S1 sube antes de permitir bajar a B1. Esto muestra que las dinámicas de ascenso y descenso están traslapadas en la mayoría de los casos, incluso en densidades sumamente pequeñas. En la Imagen 4.11 se observa como el pasajero S1 sube antes de permitir la salida al pasajero B1, el pasajero S1 se acomoda exactamente en la esquina y el pasajero S2 sube al mismo tiempo que baja el pasajero B1. Esta mala organización genera el rompimiento de los flujos haciendo lento el proceso de ascenso y descenso aún y cuando son muy pocas personas las que están involucradas.

## Ascenso y descenso de pasajeros



Imagen 4.10. Video 54, hora de viaje: 19:45 min.



Imagen 4.11. Video 54, hora de viaje: 19:46 min.

A través de estos ejemplos se mostró la formación de flujos de pasajeros en los procesos de ascenso-descenso, el número de flujos, así como la duración dependen de la saturación del sistema. No siempre podemos observar estos caminos espontáneos, pero la mayoría de las veces ocurren.

De forma “natural” se forma esta dinámica la cual contribuye a una organización que resulta ser eficiente ya que los tiempos se optimizan, es mejor formar estos flujos que encontrarse luchando por bajar y subir de manera desorganizada. Un factor que contribuye a que el flujo de descenso se forme es el “miedo” de quedarse atrapado en el vagón, ya que los pasajeros van siguiendo al primero que abre camino, y los consecuentes van reforzando la línea hasta que todos bajan, además los pasajeros de la

## Capítulo 4

plataforma esperan de forma impaciente y la única manera de iniciar el ascenso es por las zonas laterales de la puerta, dejando el flujo central para descenso.

Un mecanismo de regulación podría contribuir a organizar más eficientemente este proceso, si los pasajeros de la plataforma pudieran esperar un poco más de tal forma que se cumpliera la consigna de “deje salir antes de entrar” tendríamos ascensos y descenso tipo terminal, en este caso los tiempos no se traslaparían y serían más “limpios”, sin tanta fricción y el tiempo efectivo de ascenso-descenso sería la suma de los dos eventos.

Por otro lado también se necesita que la gente que se encuentra dentro del vagón en la zona de los tubos de las puertas contribuya a despejar el área. A veces esto no es posible debido a la saturación interna pero como se observó en el Caso 3 (saturación del vagón y de plataforma) los pasajeros encuentran la forma de subir.

Existe un umbral donde estos flujos se dejan de formar, es cuando la saturación llega a tal grado que el ascenso de pasajeros se hace imposible. Cuando el sistema se encuentra en un grado de saturación máximo los métodos de regulación apoyados por los flujos de los pasajeros no servirán, en este caso se tendrá que aplicar mecanismos de regulación más agresivos como dosificación de usuarios o cierre de andenes.

# **Capítulo 5**

## **Indicadores del proceso de ascenso y descenso de pasajeros**

A través de los datos de las tablas características de las carreras es posible hacer un análisis con los principales indicadores de rendimiento de las estaciones, dentro de estos se encuentran los tiempos de espera de los trenes en las estaciones, los tiempos de permanencia de puertas abiertas del tren, la cantidad de pasajeros en las estaciones, los tiempos de ascenso y descenso.

Este análisis está enfocado principalmente en el proceso de ascenso y descenso de pasajeros en vagones. Las preguntas que se desean contestar son; ¿cuántos pasajeros suben y bajan del vagón?, ¿cuánto tiempo tardan en realizar este proceso?, ¿el tiempo en el que permanecen las puertas abiertas es suficiente para subir y bajar?, y la pregunta fundamental del proyecto ¿cómo se podría mejorar el proceso de ascenso-descenso?

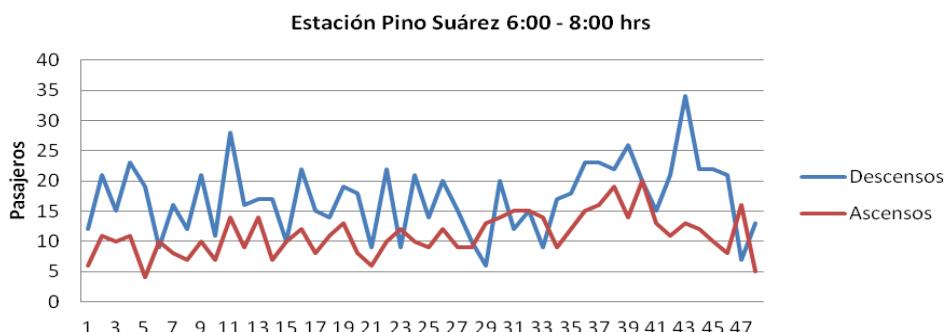
Para responder a estas preguntas se está considerando la diferenciación de dos intervalos de tiempo en el proceso de ascenso y descenso, el primero es el tiempo de puertas abiertas, y el segundo, el tiempo efectivo de ascenso y descenso. Hacer esta separación permitirá entender la rapidez del proceso, el tiempo de sobra o inactividad y las posibles regulaciones para mejorar y agilizar el ascenso-descenso.

## Capítulo 5

A continuación se describen los análisis realizados para el estudio local enfocados en el proceso de ascenso y descenso de pasajeros en las estaciones considerando los videos 15, 32, 38, 41, 39, 42, 43, 45, 47, 49, 53, 51, 50 y 54.

### 5.1 Conteo de ascensos y descensos

Los conteos de ascensos y descensos de pasajeros es la información básica para comprender la dinámica. Recabar estos datos puede convertirse en una tarea ardua, es difícil hacer conteos en tiempo real debido a las grandes saturaciones. Los conteos se realizaron a través de las videogramaciones y de un software adecuado para ver los videos cuadro por cuadro.



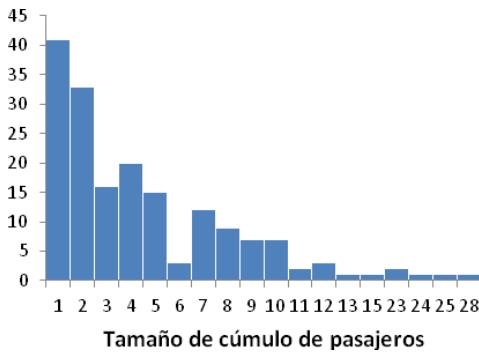
Grafica 5.1. Serie de tiempo de ascenso y descensos en la estación Pino Suárez respecto a una puerta.

La serie de datos muestra temporalmente el número de pasajeros que suben y que bajan del vagón, existen momentos de mayor actividad. Para tener mayor conocimiento de la dinámica se realizaron histogramas para observar la distribución de pasajeros en función de los cúmulos de pasajeros que suben y bajan en el intervalo de puertas abiertas.

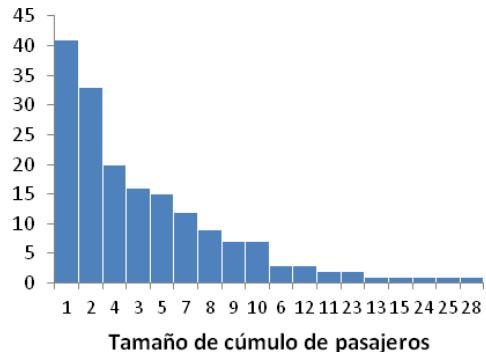
En la Gráfica 5.2 y 5.3 se muestra el histograma de ascenso y el histograma de ascenso ordenado respectivamente, la muestra comprendió momentos de saturación y de no saturación dependiendo de los horarios en todas las estaciones de la línea 1. Esta distribución es un patrón general de la línea,

## Indicadores del proceso de ascenso y descenso

los eventos más probables son los ascensos de cúmulos pequeños y conforme aumenta el tamaño del cúmulo se hacen menos probables, no es totalmente exacta la relación rango-orden (tamaño de cúmulo y frecuencia) pero se acerca a algo semejante. Se necesitan más muestras para ajustar estas distribuciones.



Gráfica 5.2. Histograma ascensos

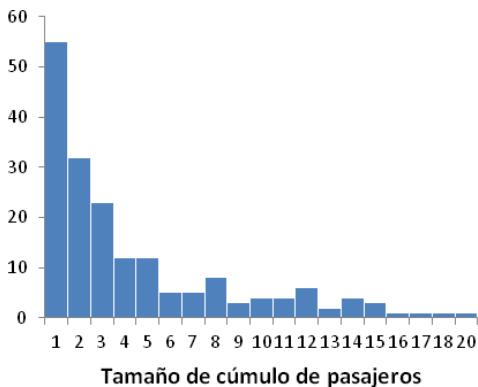


Gráfica 5.3. Histograma ordenado ascensos

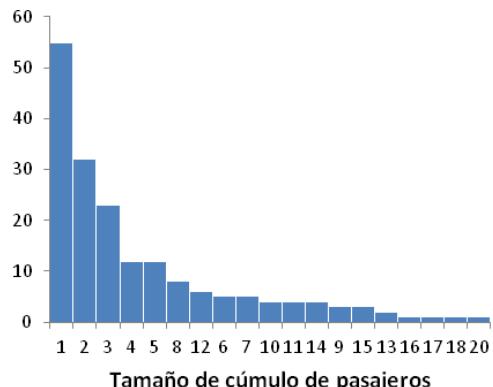
La frecuencia más alta de eventos son los cúmulos de 1 a 2 pasajeros, lo que implica que la gente viaja sola o acompañada. Los menos probables (los grandes eventos) son identificados en estaciones conflictivas como Pantitlán, Zaragoza, Pino Suárez, Balderas, Salto del Agua e Insurgentes

En la Gráfica 5.4 y 5.5 se muestra el histograma de descenso y descenso ordenado, también se observa que los eventos más frecuentes son los cúmulos pequeños de 1 a 2 pasajeros, a diferencia del histograma de ascenso, el de descenso tiene una caída más pronunciada, lo que implica que no es muy frecuente observar descensos muy grandes.

## Capítulo 5

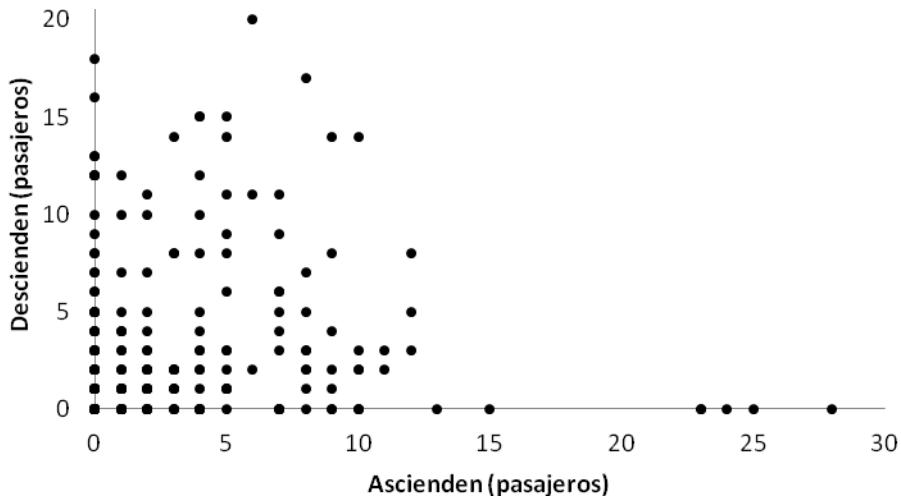


Gráfica 5.4. Histograma descenso



Gráfica 5.5. Histograma ordenado descenso

En la Gráfica 5.6 se muestra el tamaño del ascenso contra el tamaño del descenso medidos en una sola puerta del vagón. Existen una región de tamaño  $10 \times 10$  en el plano donde se concentran la mayoría de los eventos. En la gráfica la coordenada  $(0,0)$  indica los eventos donde no subieron ni bajaron pasajeros. De la misma manera, sobre el eje X se representan los eventos que no tuvieron descensos y sobre el eje Y los que no tuvieron ascensos; existen algunos ascensos grandes sobre el eje X mientras que en Y no descensos de esta magnitud. Si promediamos el número de ascenso y descensos, se tiene como resultado la coordenada  $(3,3)$  lo que indica que en cada puerta suben en promedio 3 pasajero y bajan 3 pasajeros, este número representa todas las dinámicas del sistema, cuando está saturado y cuando no lo está.



Gráfica 5.6. Ascensos contra descensos.

## 5.2 Tiempo de puertas abiertas.

El tiempo de puertas abiertas es un indicador de rendimiento. La Tabla 5.2 muestra los tiempos promedio de puertas abiertas considerando un conjunto de videos de la investigación. El tiempo mínimo en promedio registrado es de 18 segundos en un viaje que tuvo mínima afluencia de pasajeros, por otro lado, la carrera con los videos 49-53, un viaje muy conflictivo, tuvo un promedio de puertas abiertas de 84 segundos, como se puede observar este intervalo de tiempo es un indicador de estabilidad de la línea completa ya que es un reflejo del rendimiento de la carrera además de impactar directamente el tiempo de espera del tren en la estación.

## Capítulo 5

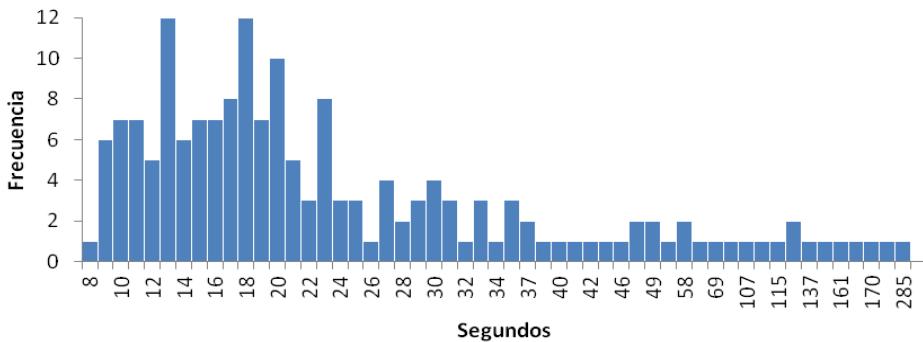
Video	Tiempo promedio de puertas abiertas (s)	Desviación estándar
15	31.15	32.20
32	33.05	28.98
38-41	37.50	22.18
39-42	21.15	25.15
43	28.00	34.04
45-47	30.00	34.86
49-53	84.23	93.41
51	19.50	8.64
50-54	18.45	26.27
<b>Promedio</b>	<b>33.67</b>	
<b>Desviación Estándar</b>		<b>20.03909554</b>

Tabla 5.2 Tiempos promedio de puertas abiertas.

En promedio el metro tienen un tiempo de puertas abiertas de 33 segundos con una desviación estándar alta del promedio, lo que indica la inestabilidad del sistema. También las desviaciones estándar de los promedios de cada video son bastante altas lo que muestra una gran dispersión de los tiempos, incluso cuando las carreras tienen un tiempo de viaje “bueno”.

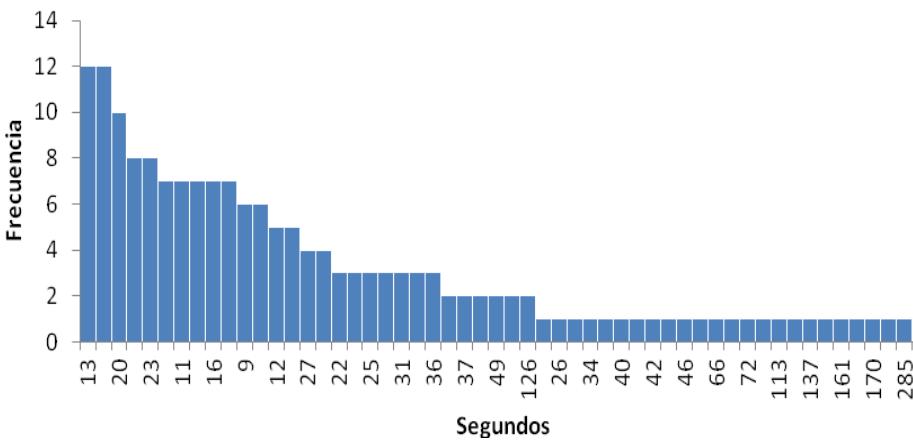
La Gráfica 5.11 muestra el histograma del tiempo de permanencia de puertas abiertas; el menor tiempo que se tiene registrado es de 8 segundos y máximo es de 285 segundos (aproximadamente, 4:30 min); el más frecuente es de 13 y 18 segundos; la densidad más grande de eventos se encuentra entre los 9 y 26 segundos. No hay un patrón definido sobre el comportamiento del tiempo de apertura, es bastante irregular para una variable que debe estar controlada ya que está ligada al tiempo de permanencia del tren en la estación.

## Indicadores del proceso de ascenso y descenso



Gráfica 5.11. Histograma de tiempos de puertas abiertas.

La Gráfica 5.12 muestra en orden decreciente los valores del histograma de puertas abiertas, los tiempos más probables rondan entre los 11 y 20 segundos, son tiempos razonables de permanencia de puertas abiertas, mientras que la cola del histograma pertenece a tiempos largos. Una estrategia de regulación puede ser tratar de cortar los valores que se encuentran en la cola del histograma.



Gráfica 5.12. Histograma ordenado de tiempo de puertas abiertas.

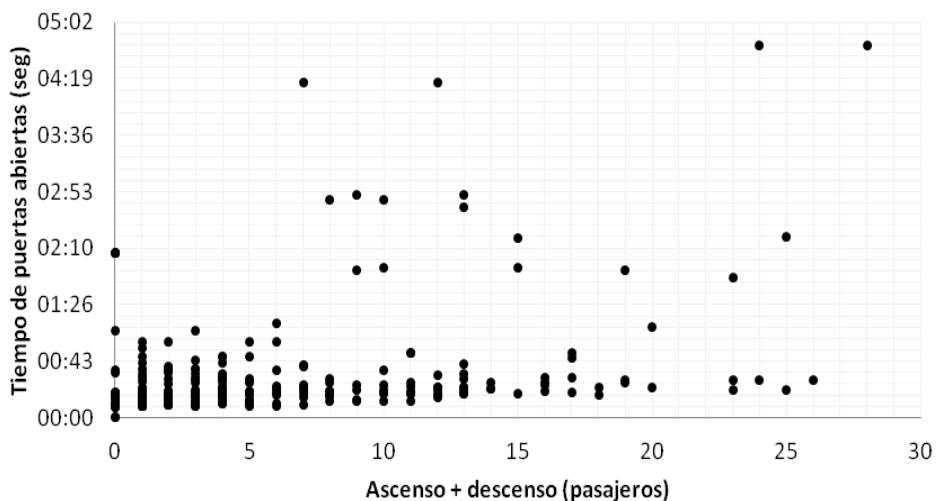
A través de los histogramas se puede observar la estabilidad de la permanencia de puertas abiertas, si estos son muy dispersos entonces estarán

## Capítulo 5

poco regulados y si la distribución es compacta indica que están mejor reguladas.

Sería deseable que estos histogramas permaneciera solo en un cierto rango, por ejemplo de 24 segundos (el propuesto por el Metro para la línea 1) más o menos un rango de flexibilidad.

En la Gráfica 5.13 se muestran los eventos de ascenso y descenso respecto al tiempo de puertas abiertas. Se puede observar que existen eventos donde el tiempo de puertas abiertas es muy grande y el número de pasajeros que suben o bajan son relativamente pocos. Es de notar que los eventos en la parte superior derecha, en los que están contados 24 y 28 pasajeros en tiempos de aproximadamente 4:40 min, la cantidad de pasajeros en el proceso de ascenso y descenso se “infló” por la gran permanencia del tren en la estación. Existen eventos con una cantidad parecida de pasajeros que se realizaron en 20-25 segundos.

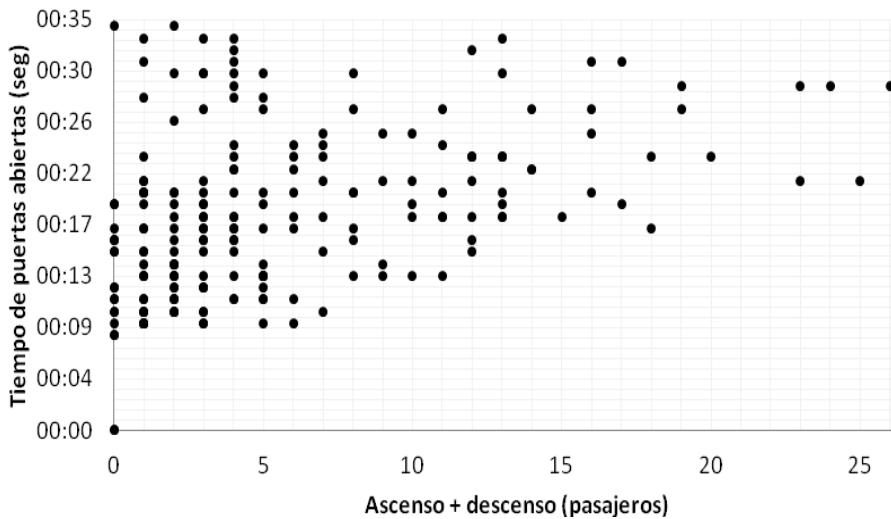


Gráfica 5.13. Ascenso-descenso en tiempo de puertas abiertas.

En la Gráfica 5.14 se hace un *zoom* para observar mejor la distribución de eventos. Se puede apreciar que los eventos donde no subieron o bajaron pasajeros tuvieron un tiempo muy variable de puertas abiertas, desde 9 segundos hasta 34. Estas gráficas no reflejan cuánto tardaron los

## Indicadores del proceso de ascenso y descenso

pasajeros en subir y bajar, sólo podemos decir que en este intervalo de tiempo subieron y bajaron “tantos” pasajeros.



Gráfica 5.14. Zoom

No hay una correlación entre el número de pasajeros que suben, bajan y el tiempo de puertas abiertas, es decir, aunque el tren espere en la estación demasiado tiempo no implica que suban más pasajeros, depende de la afluencia de pasajeros en el momento.

Sin duda, la dispersión de los tiempos de puertas abiertas es uno de los elementos que la administración del Metro tiene que regular. Existen muchos factores que considerar para regular este tiempo, como las órdenes del Regulador, las decisiones del conductor, las obstrucciones por parte de los pasajeros, y sumemos que esto impacta directamente el rendimiento de los trenes vecinos. Se debe pensar en una regulación integral para estabilizar los tiempos de puertas abiertas.

A continuación se definirá y explicará el concepto de tiempo efectivo de ascenso-descenso que se propuso para la investigación debido a la necesidad de obtener el tiempo invertido en el ascenso y descenso de pasajeros del vagón independientemente del tiempo de puertas abiertas.

### 5.3 Tiempo efectivo ascenso-descenso

El tiempo efectivo de ascenso y descenso es 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.

En el momento en el que llega el tren a la estación y se abren las puertas inicia el proceso de ascenso y descenso de pasajeros, considerando la movilidad de los pasajeros este proceso puede terminar antes o exactamente cuando el tren cierra sus puertas. Debido a la dinámica del metro (al menos en la Ciudad de México), el tiempo de puertas abiertas no es regular ya que puede ser muy corto, por ejemplo 8 segundos (ver Video 39, minuto 11:16) o muy largo 4:45 minutos (ver Video 53, minuto 39:22), en tal caso el pasajero no tiene la certidumbre de cuánto tiempo permanecerán abiertas las puertas cuando llega el tren a la estación<sup>8</sup>. Este intervalo de tiempo sólo puede ser considerado como una cota superior pero no describe el tiempo efectivo empleado en el proceso de ascenso y descenso. La mayoría de las veces el tiempo que ocupan los pasajeros para subir y bajar es menor que el tiempo de permanencia de puertas abiertas.

Por tal motivo se definió el *tiempo efectivo de ascenso-descenso* que depende totalmente de la dinámica de los pasajeros. Inicia cuando el cúmulo principal de pasajeros en la plataforma y el cúmulo principal de pasajeros en el vagón, suben y bajan respectivamente, y finaliza cuando terminan de hacerlo, siempre ubicando a los flujos principales. Los pasajeros que llegan después y todavía están las puertas abiertas ya no son considerados porque no estuvieron involucrados en el flujo principal. Este intervalo de tiempo no considera cuando los pasajeros se acomodan en sus lugares o hacen la búsqueda de un lugar, sólo es el momento en el que suben o bajan. En la siguiente secuencia de Imágenes 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 se muestra un ejemplo tomado del video 41 para observar la evolución del proceso de ascenso y

---

<sup>8</sup> Es importante considerar una regulación de permanencia de puertas abiertas, el problema radica en que este tiempo está asociado al tiempo de permanencia del tren en la estación.

## Indicadores del proceso de ascenso y descenso

descenso. En total estuvieron involucradas 18 personas en el proceso, bajaron 11 y subieron 7 en un total de 15 segundos. El tiempo de puertas abiertas duró 17 segundos. Este ejemplo es de los más saturados y más dinámicos. El tiempo de puertas abiertas casi coincide con el tiempo efectivo de ascenso y descenso.



Imagen 5.1. Los pasajeros esperan la apertura de pertas para descender.



Imagen 5.2. Proceso de descenso. Bajan 11 pasajeros.



Imagen 5.3. Bajan los pasajeros e inmediatamente empiezan a subir los que se encuentran en la plataforma, se observa el área central desocupada.



Imagen 5.4. Suben 7 pasajeros. Se completa el proceso de ascenso y descenso. Ya no hay más pasajeros que deseen abordar. Esperan el cierre de puertas.

En el siguiente ejemplo mostrado con las Imágenes 5.5, 5.6, 5.7, y 5.8, se observa la diferencia de puertas abiertas y el proceso de ascenso y descenso, los tiempos no coinciden así que da lugar a arribos de una o más personas.

## Capítulo 5



Imagen 5.5. Termina el proceso efectivo de ascenso y descenso.



Imagen 5.6. Debido al tiempo de espera baja un pasajero, posteriormente sube otro.



Imagen 5.7. Suben 2 pasajeros más.



Imagen 5.8. Suben otros más y se satura el vagón.

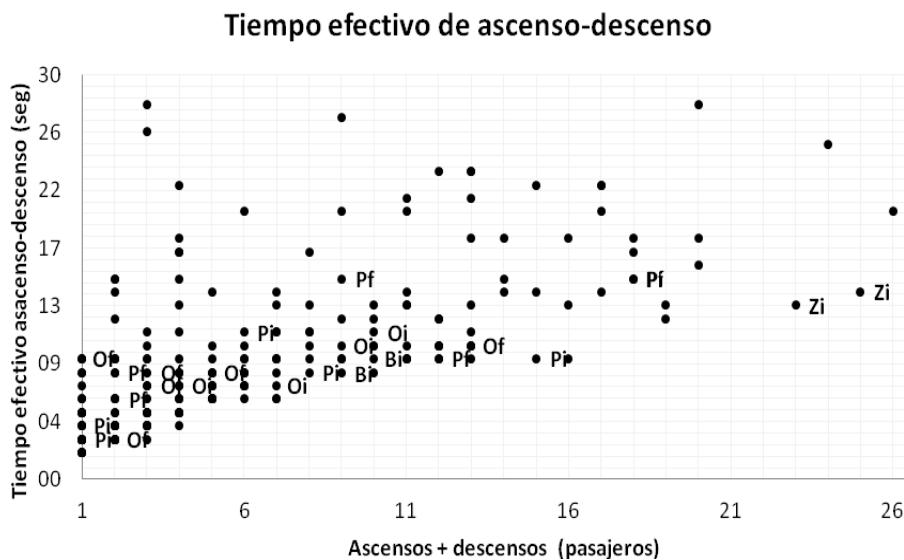
Una diferencia grande entre el tiempo de puertas abiertas y el tiempo efectivo de ascenso-descenso fomenta la saturación del vagón. Pero ¿qué porcentaje de los pasajeros están involucrados en el tiempo efectivo de ascenso y descenso?

La Tabla 5.1 muestra que aproximadamente del 91% de los pasajeros están incluidos en el tiempo efectivo de ascenso y descenso, el tiempo invertido más alto es de 13.1 segundos y el menor es de 3.55 segundos, el promedio se encuentra alrededor de los 8 segundos. Es importante notar que la desviación estándar del porcentaje de los pasajeros inmersos en el proceso es baja, lo que implica que la mayoría de los pasajeros están preparados para subir y para bajar pero no necesariamente de manera organizada. Los tiempos invertidos también son relativamente bajos, la primera implicación de este resultado es que el tren permanece con las puertas abiertas más de lo necesario. Con una regulación adecuada de tiempos de puertas abiertas se podría disminuir los tiempos totales de viaje.

## Indicadores del proceso de ascenso y descenso

Video	Porcentaje de pasajeros en el tiempo efectivo de ascenso-descenso	Promedio del Tiempo efectivo de ascenso-descenso (seg)
15	95.86%	13.10
32	94.80%	10.70
38	94.12%	9.89
41	92.41%	7.75
39	80.77%	4.50
42	95.56%	3.55
43	93.81%	6.15
45	90.32%	12.37
47	96.79%	12.47
49	81.43%	8.20
53	80.17%	8.31
51	96.77%	8.05
50	93.65%	4.20
54	100%	3.25
<b>Promedio</b>	<b>91.89%</b>	<b>8.04</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>0.064222871</b>	<b>3.38</b>

Tabla 5.1. Porcentajes de pasajeros involucrados en el tiempo efectivo de ascenso-descenso.



Gráfica 5.6. Distribución de eventos (ascensos y descensos) a partir del tiempo efectivo.

En la Gráfica 1 se muestra el 91% de los pasajeros involucrados en el tiempo efectivo de ascenso-descenso, el otro 9% son pasajeros que llegaron después y por lo tanto no están contabilizados. Cada punto pertenece a un evento de ascenso-descenso identificado por la suma de los pasajeros que suben y que bajan y el tiempo efectivo empleado para realizar este proceso.

La parte más densa de la gráfica corresponde a eventos donde están involucrados pocos pasajeros, y como consecuencia se requiere de poco tiempo para efectuar el proceso, existen varios eventos que se desarrollan con gran saturación los cuales corresponden aproximadamente del segundo 15 en adelante. Las etiquetas de los puntos indican eventos que se desarrollan en las terminales, por ejemplo la etiqueta **Oi** indica la estación Observatorio en el inicio de la carrera, **Of** indica la estación Observatorio al final de la carrera, **Pi** y **Pf** indican la terminal Pantitlán al inicio y al final. Cuando el tren no inicia la carrera en las terminales lo hace en las estaciones siguientes, por ejemplo la etiqueta **Zi** indica la estación Zaragoza al inicio de la carrera, y existe también una etiqueta **Bi** correspondiente a Balderas al inicio de la carrera.

## Indicadores del proceso de ascenso y descenso

Los puntos con mayor densidad de pasajeros y tiempos relativamente pequeños se generan con pasajeros que solamente suben o bajan como en las terminales. Por ejemplo los puntos con las etiquetas **Zi** muestran ascensos de 24 a 27 personas realizados de 13 a 15 segundos, mientras que ascensos y descensos en estaciones normales donde se involucra esa misma cantidad de pasajeros puede tardar el doble de tiempo en completar el proceso. Este comportamiento muestra una ventaja que puede ser explotada con algún tipo de estrategia, es decir, las terminales tienen ascensos y descensos sin obstrucciones, ¿sería posible recrear este tipo de comportamiento en las estaciones normales?

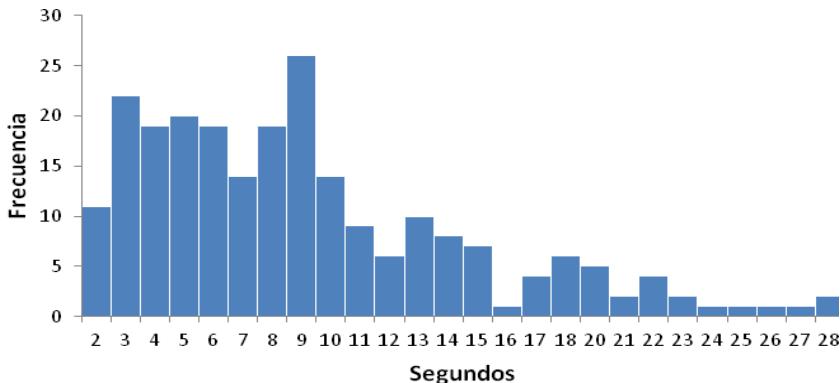
La gráfica también muestra cómo crece el tiempo en función de la densidad de la gente, la cota inferior muestra los procesos más rápidos mientras que la cota superior muestra los momentos en que hay gran saturación tanto dentro como fuera de la plataforma y no es posible subir o bajar adecuadamente, el tiempo máximo en el proceso está acotado por el cierre de puertas del vagón, aunque hay que considerar que este es muy variable en sistemas de metro que no están totalmente regulados. El número de pasajeros que suben y que bajan son sumados ya que los procesos no se pueden separar, hay un momento en el que simultáneamente ocurren las dos cosas, existe una intersección entre el tiempo de los pasajeros que suben y los que bajan.

Un factor importante para que el tiempo efectivo de ascenso y descenso no sea tan grande es la cultura del pasajero, los tiempos más grandes corresponden a personas que tratan de subir a como dé lugar, por ejemplo, uno de los tiempos más grandes registrados, de 26 a 20 segundos, fue de 3 pasajeros que deseaban subir en un vagón completamente saturado. Por el contrario los eventos más rápidos, aun considerando una gran cantidad de pasajeros, son en las terminales de inicio donde todos suben o las finales donde todos bajan, son considerados ascensos y descensos “limpios” porque no hay obstrucciones.

El histograma del tiempo efectivo de ascenso-descenso muestra cuáles son los eventos más comunes considerando el tiempo invertido. Los ascensos y/o descensos más rápidos ocurren con una inversión de 2 segundos, en estos eventos sube o baja un pasajero, la inversión de tiempo más común se encuentra de 3 a 9 segundos, el máximo se encuentra en 9 segundos y por la Gráfica 5.6 el número de pasajeros que suben y/o bajan se encuentra dentro

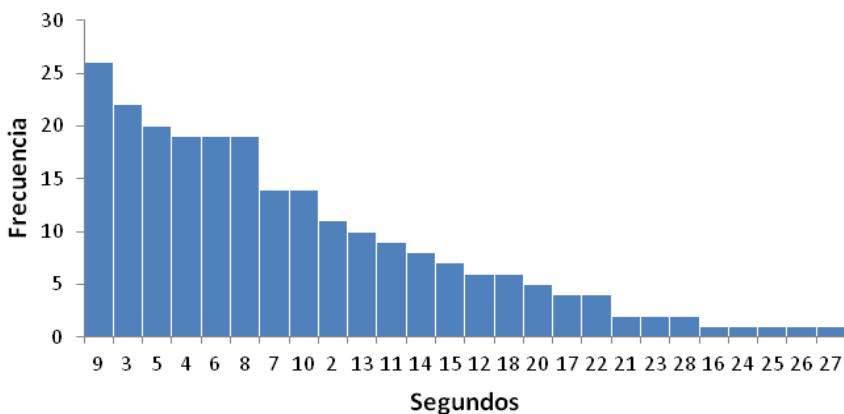
## Capítulo 5

del rango de 1 a 16, la cota superior de 16 pasajeros se realizó en una terminal.



Gráfica 5.7. Histograma del tiempo efectivo de ascenso-descenso

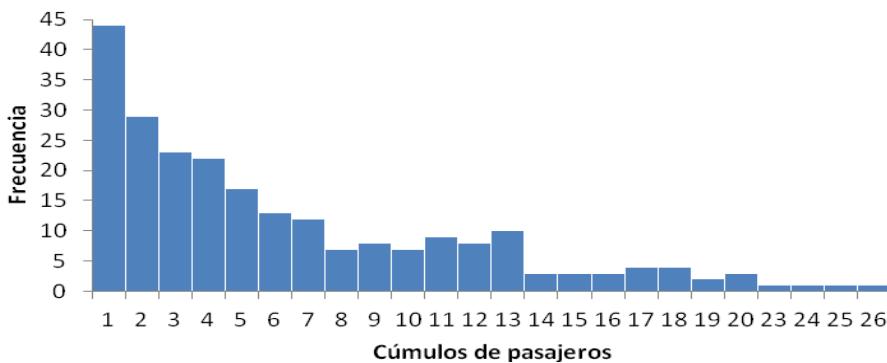
La Gráfica 5.7 muestra el histograma ordenado de los eventos del más frecuente al menos frecuente. La tendencia es que decrece de forma cuadrática, se puede observar que aunque los segundos no coinciden con el ordenamiento de frecuencias el rango de 16 a 28 segundos se hace menos probable, lo que implica que establecer un tiempo fijo de 24 segundos para acotar el tiempo de puertas abiertas es adecuado.



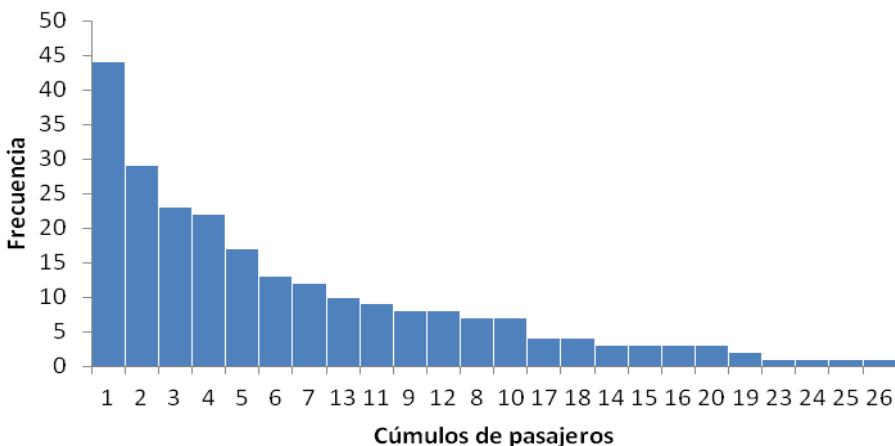
Gráfica 5.8. Histograma ordenado del tiempo efectivo de ascenso-descenso

## Indicadores del proceso de ascenso y descenso

Se puede generar otro histograma respecto a la Gráfica 5.6 proyectando en el eje “ascensos + descensos”. La Gráfica 5.9 muestra la cantidad de eventos que ocurren en función de los pasajeros que participan en el proceso de ascenso-descenso. El evento más común es cuando participa solo una persona, es decir, una persona que sube o una persona que baja, posteriormente siguen cúmulos de 2 pasajeros, de 3 pasajeros, y así sucesivamente hasta el cúmulo de 8 pasajeros, después hay una tendencia a subir hasta procesos donde están involucrados 13 pasajeros, luego desciende, no es muy probable ver cúmulos de 23 pasajeros en adelante.



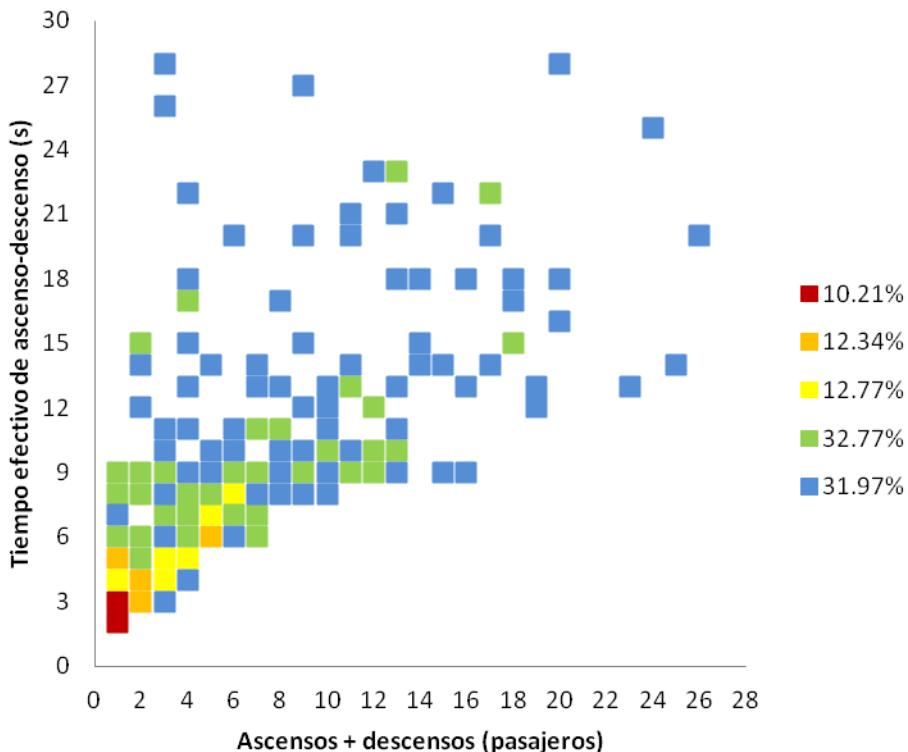
Gráfica 5.9. Histograma de cumbulos de pasajeros  
(suma de ascensos y descensos).



Gráfica 5.10. Histograma ordenado de cumbulos de pasajeros.

## Capítulo 5

El histograma ordenado mostrado en la Gráfica 5.10, refuerza la hipótesis de que el proceso de ascenso descenso está gobernado por eventos con pocos pasajeros los cuales requieren de poco tiempo para bajar o subir. Y hay pocos eventos donde bajan y/o suben muchos pasajeros.



Gráfica 5.11. Histograma 2D de la densidad de pasajeros en el proceso de ascenso-descenso en función del tiempo efectivo.

El histograma en dos dimensiones muestra los eventos más probables, las regiones rojas, ámbar y amarillas, es una zona muy compacta, suman el 35% de los casos, mientras que, las zonas verdes y azules suman el 65%, las cuales están muy dispersas sobre el plano. Esto implica que los ascensos más “rápidos” y sin tanta fricción equivale al 35% de los casos, ya que son densidades bajas de pasajeros y tiempos relativamente pequeños, mientras que el otro 65% son como una envoltura para los “mejores casos”, se compone de eventos muy rápidos (cota inferior) y de eventos complicados con tiempos altos y/o densidades altas.

Interesan las zonas que están por debajo de los 24 segundos, ya que son los tiempos teóricos que deberían establecerse para las puertas abiertas. Resulta viable manejar estos tiempos, los pasajeros pueden subir y bajar sin problemas, incluso resultaría en un beneficio por que se “podarían” los eventos donde se encuentran pasajeros “necios”, es decir, lo que tratan de subir a como dé lugar, como el caso, de 3 pasajeros que suben en casi 30 segundos.

## 5.4 Tiempo de puertas abiertas vs tiempo efectivo de ascenso-descenso

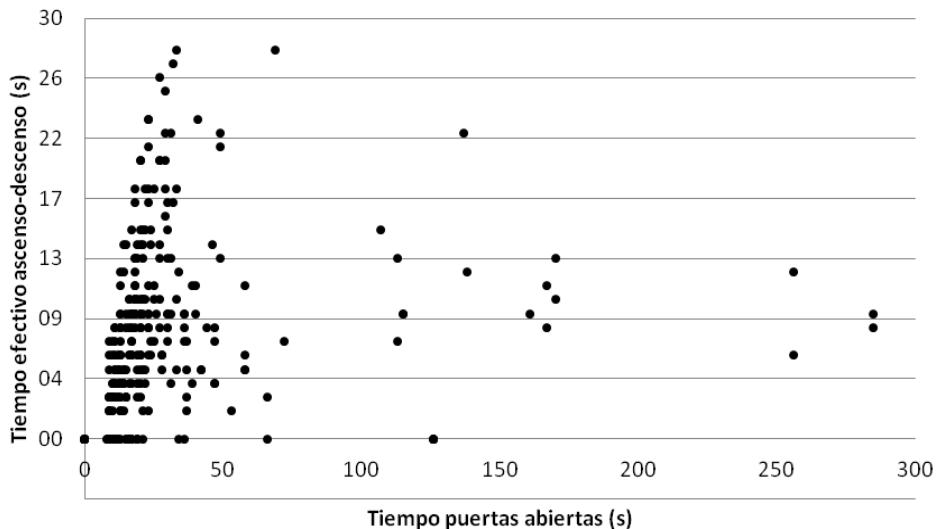
Este análisis presenta la distribución de puntos del tiempo efectivo de ascenso-descenso acotado por el tiempo de puertas abiertas. Se puede observar cuánto tiempo tarda la gente en subir o bajar y el tiempo que existe de sobra hasta cerrarse las puertas. Existen dos casos por los que ya no hay intercambio de pasajeros, o ya está saturado el vagón o no hay pasajeros en la plataforma, ambos casos son dinámicas extremas.

Si la gráfica presenta una relación proporcional al tiempo efectivo de ascenso-descenso y al tiempo de puertas abiertas estaríamos en un esquema de despacho bajo demanda, es decir, el tren cerraría las puertas hasta que los pasajeros subieran o bajaran dependiendo de la densidad. Por el contrario si tuviéramos una Línea de metro totalmente regulada no importaría el flujo de la gente, el tiempo de permanencia del tren sería el mismo y esto generaría una gráfica acotada en el eje de tiempo de puertas abiertas. En los sistemas de transporte público es difícil cumplir un esquema tan rígido (tiempos fijos) o tan dependiente de los pasajeros (despacho bajo demanda).

La Gráfica 5.11 muestra el tiempo de puertas abiertas en función del tiempo efectivo de ascenso-descenso. La proporción de tiempos entre estas dos variables varía casi en un factor de 10, mientras que el máximo tiempo efectivo registrado es de 28 segundos, el de puertas abiertas es de 280 segundos. Los pasajeros, aún con alta saturación, bajan rápidamente, esto es algo benéfico porque se puede acotar el tiempo de puertas abiertas aún más. Debe de existir también una regulación de puertas abiertas, el cúmulo principal se observa entre los 10 y 35 segundos, si fuera posible que los

## Capítulo 5

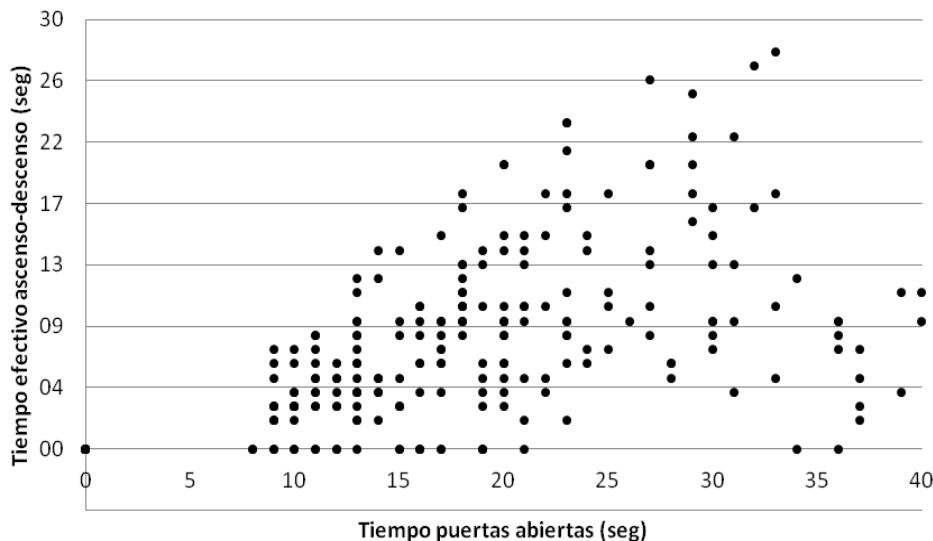
trenes mantuvieran este rango beneficiaría a la estabilización de la frecuencia de paso de los trenes (headway) y a toda la línea.



Gráfica 5.11. Tiempo de puertas abiertas en función del tiempo efectivo de ascenso-descenso.

La Gráfica 5.11 muestra un acercamiento donde se aprecia que la cota superior describe una línea recta casi con pendiente uno, lo que indica que hay momentos en que el proceso efectivo de ascenso-descenso coincide con el tiempo de puertas abiertas. Este caso es el extremo, es decir, la gente tarda tanto en subir o bajar o ambas que se ven restringidos por el cierre de puertas, aunque no es lo común. Lo normal es que suba o baje antes de que cierre la puerta, al parecer hay 3 o 4 segundos de sobra para que se cumpla el tiempo efectivo.

## Indicadores del proceso de ascenso y descenso



Gráfica 5.12. Acercamiento de la Gráfica TPA vs TEAD

En el siguiente capítulo se presentarán dos propuestas de regulación para el proceso de ascenso y descenso utilizando simulaciones computacionales, atacando los problemas de los tiempos de puertas abiertas y tratando de mejorar el tiempo efectivo de ascenso-descenso.

## Capítulo 5

# **Capítulo 6**

## **Propuesta de regulación para el proceso de ascenso y descenso de pasajeros**

El objetivo principal del proyecto de investigación es el planteamiento de estrategias de regulación para los procesos de ascenso y descenso en el metro de la Ciudad de México.

Con base en los estudios y análisis presentados a lo largo de este reporte de investigación se propone un método general de regulación que consta de dos partes; la primera es un método de “Regulación de intervalos de tiempo de puertas abiertas”, el cual ataca la inestabilidad del tiempo de puertas abiertas a través de tiempos adecuados 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 para ascenso y descenso”, el cual propone que, a través de señalamientos básicos en plataforma, contribuya a regular y fomentar la formación de flujos de pasajeros en el ascenso y descenso; la segunda propuesta es el método de “Puertas dedicadas para ascenso y descenso”, en el cual se asignan puertas exclusivas para entrar y salir del vagón. Las propuestas se fundamentan en los estudios y análisis realizados en la Línea 1 del Metro respecto al *tiempo efectivo de ascenso-descenso*.

## Capítulo 6

Debido a la complejidad de los sistemas de transporte públicos resulta costoso y en algunas ocasiones inaccesible implementar y probar estrategias de regulación de cualquier tipo, por tal motivo la investigación se apoya en las simulaciones computacionales para probar lo métodos de regulación propuestos en ambientes recreados 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 [6], [7].

### 6.1 Simulación computacional. *Modelo de fuerzas sociales*

Los modelos de comportamiento de los peatones han encontrado un interés notable debido a que pueden proporcionar valiosas herramientas para el diseño y la planificación de zonas peatonales, estaciones de metro o ferrocarril, grandes edificios, centros comerciales, etc. Un modelo que ha mostrado mediante simulaciones por computadora patrones colectivos similares a los que se presentan en la realidad, en la interacción de los peatones, es el modelo de “Fuerzas Sociales”. Por lo tanto, es el modelo utilizado en este proyecto para simular a los peatones dentro de las estaciones del metro.

En el modelo de “Fuerzas sociales” el movimiento de los peatones se describe como el resultado de la suma de fuerzas que reflejan las motivaciones internas de los individuos para realizar determinadas acciones. El comportamiento de cada peatón se describe por la aplicación de las fuerzas: *velocidad deseada*, *fuerza de repulsión de obstáculos* y *fuerza de interacción*. La fuerza de velocidad deseada describe la motivación del peatón en alcanzar una aceleración y dirección acorde al lugar que desea llegar. La fuerza de repulsión de obstáculos refleja el deseo del peatón de mantener una cierta distancia de los bordes (muros, vallas, barandales, etc.). La fuerza de interacción refleja el movimiento del peatón cuando se encuentra con otro peatón.

El simulador implementado para el Sistema de Transporte Colectivo Metro tiene como base las funciones de la biblioteca PEDSIM (Microscopic Pedestrian Crowd Simulation System) de Christian Gloor [10]. Es una

biblioteca implementada en el lenguaje de programación “C”, a la cual, se le hicieron modificaciones importantes para la creación del simulador.

Las estrategias de regulación que se propongan con los datos de la investigación pueden ser estudiadas y analizadas a partir del simulador y la experimentación, de esta manera, la administración el Sistema de Transporte Colectivo cuenta con una herramienta útil para tomar decisiones correctas. En el Anexo 1 se encuentra el manual de usuario del simulador para implementar diferentes casos de las estrategias de regulación.

A continuación se hace una breve descripción del estado actual del proceso de ascenso y descenso.

## **6.2 Estado actual del proceso de ascenso-descenso.**

Para el buen funcionamiento del Metro se necesita de la regulación de muchos aspectos, uno de ellos, es el proceso de ascenso y descenso de pasajeros. Es una parte vital en los tiempos de recorrido de los trenes, sin una regulación adecuada, se convierte en una fuente de retrasos importante. El comportamiento y las acciones de los usuarios repercuten directamente en el rendimiento del sistema. Regular el comportamiento de las personas es, sin duda, uno de los mayores retos para optimizar los tiempos de recorrido de los trenes.

Se asume que los pasajeros tratan de optimizar individualmente<sup>9</sup> dos aspectos importantes, el tiempo de viaje y su comodidad<sup>10</sup>. En altas saturaciones la comodidad pasa a segundo término, mientras que en poca saturación le da más importancia a su comodidad. Otro aspecto importante es que la mayoría de los usuarios tratan de subir al vagón a como dé lugar, sin importar que el vagón llegue saturado o con un mínimo de capacidad disponible. Por lo tanto hay tres cosas que se deben considerar de los usuarios:

<sup>9</sup> Se usa la palabra *individualmente* para denotar que las estrategias que usan los pasajeros en su trayecto en el Metro no tienen (o muy poco) aspectos de negociación con otros usuarios.

<sup>10</sup> Se usa *comodidad* como un aspecto importante porque los usuarios en el interior del vagón se mueven por lugares o zonas preferenciales (ver reporte del mes de Abril).

## Capítulo 6

- 1- Optimización de tiempo de viaje y comodidad.
- 2- No se permiten tiempos de espera en plataforma para tomar otros trenes.
- 3- Tiempo de espera forzado en caso de saturación de vagón.

Cualquier estrategia de regulación que se proponga no debe asumir el buen comportamiento de los pasajeros, en este caso se debe acotar las acciones conductuales de los usuarios por algún medio.

La estrategia de regulación actual para el ascenso y descenso es insuficiente, la leyenda que está en todos los vagones del metro “Antes de entrar permita salir” es poco respetada y aplicada por pocos usuarios. Lo normal es que cuando arriba el tren, los pasajeros se encuentran esperando en la plataforma casi distribuidos homogéneamente, esto provoca que los usuarios queden parados frente a las puertas y los usuarios que se disponen a bajar se encuentren o choquen con los que se disponen a subir ya que no se hacen a un lado.



Imagen 6.1. Terminal Pantitlán, 7:50 am.



Imagen 6.2. Estación Balderas, 08:36 am.

La Imagen 6.1 muestra como los usuarios se reparten en la plataforma de la terminal. En este caso el ascenso es sumamente rápido debido a que el tren está vacío Por otro lado la Imagen 6.2 muestra lo complicado que pueden ser los ascensos y descenso en momentos de saturación.



Imagen 6.3 Ascenso-descenso en estación Pino Suárez.

La Imagen 6.3 muestra como los pasajeros de la plataforma bloquean el proceso de descenso. La falta de regulación y de orden genera fricción y empujones entre los pasajeros.

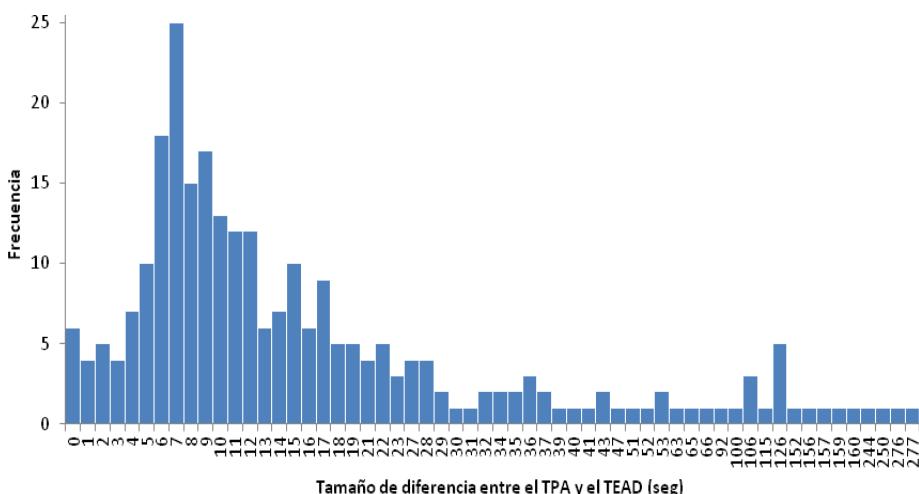
Para medir el tiempo de ascenso y descenso usamos el *tiempo efectivo de ascenso-descenso*, que indica el tiempo empleado en subir y bajar del vagón considerando el cúmulo principal de pasajeros tanto del interior del vagón como de la plataforma. El 91% de los pasajeros que desean subir o bajar se encuentran involucrados en este cúmulo principal. La cota inferior de esta distribución (ver Gráfica 5.12) se comporta casi de forma lineal, es decir, el tiempo invertido en subir o bajar es proporcional al número de pasajeros. Ahora, la cota superior esta descrita por los casos con mayor tiempo invertido y que en casos extremos coincide con el tiempo de cierre de puertas.

La cota inferior puede considerarse como el tiempo mínimo necesario para subir o bajar adecuadamente, la cota superior de la distribución refleja momentos de saturación y de falta de regulación. Por ejemplo, los puntos (3,26) y (3,28) de la Gráfica 5.12 indican que 3 pasajeros involucrados en el proceso efectivo de ascenso y descenso tardaron 26 y 28 segundos en subir, mientras que el rango normal son de 3 a 10 segundos. Para estos casos el tiempo de puertas abiertas coincide con el tiempo efectivo de ascenso y descenso lo que indica que el vagón estaba completamente saturado y aún así hicieron lo posible por subir. Por un evento donde están involucrados 3 pasajeros se puede retrasar la salida del tren y la pérdida de la frecuencia de

## Capítulo 6

paso o headway. Este tipo de casos hacen que el cierre de puertas sea complicado y por consiguiente se generen retrasos, por esto es de alta prioridad implementar un mecanismo de regulación para estas situaciones.

Para darle mucho más sentido a la información proporcionada por el tiempo efectivo se necesita complementarla con los tiempos de puertas abiertas, de esta manera se podría calcular la diferencia entre estos tiempos para obtener los intervalos de tiempo donde hay flujo nulo o muy poco<sup>11</sup>. Este intervalo de tiempo podría reducirse para optimizar el tiempo total de viaje.



Gráfica 6.1 Histograma de diferencias entre el TPA y TEAD

La Gráfica 6.1 muestra las diferencias entre el tiempo de puertas abiertas y el tiempo efectivo de ascenso-descenso, el valor cero segundos significa que no hubo tiempo de sobra, los pasajeros subieron y bajaron e inmediatamente se cerraron las puertas, el tiempo de sobra más frecuente es de 7 segundos, después empieza a bajar la proporción de frecuentas, se tiene una cola muy larga con distintos tiempos llegando hasta los 277 segundos (4.6 min), esto indica la inestabilidad de los tiempos de puertas abiertas.

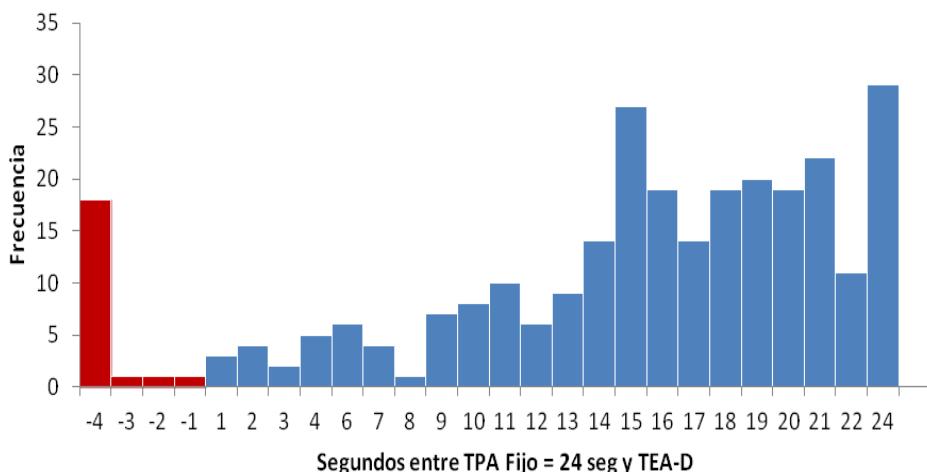
<sup>11</sup> Existen dos casos posibles por los que no habría flujo de pasajeros, el primero porque no hay usuarios y el segundo porque el vagón está en máxima saturación que ya no es posible que suba alguien más.

Con base en la argumentación anterior es indispensable proponer métodos de regulación para los tiempos de puertas abiertas, es decir, acotar los tiempos adecuadamente, y proponer estrategias de regulación de pasajeros que hagan más sencillo el ascenso y descenso.

### **6.3 Estrategia “Regulación de intervalos de tiempo de puertas abiertas”**

La Línea 1 tiene un tiempo teórico de 24 segundos para el intervalo de tiempo de puertas abiertas. Por la Gráfica 5.12 (TEAD) se puede observar que si acotáramos el proceso efectivo de ascenso-descenso en 24 segundos solo dejaríamos afuera a los puntos más conflictivos.

La Gráfica 6.2 muestra la distribución de frecuencias para el caso de aplicación de 24 segundos de puertas abiertas.



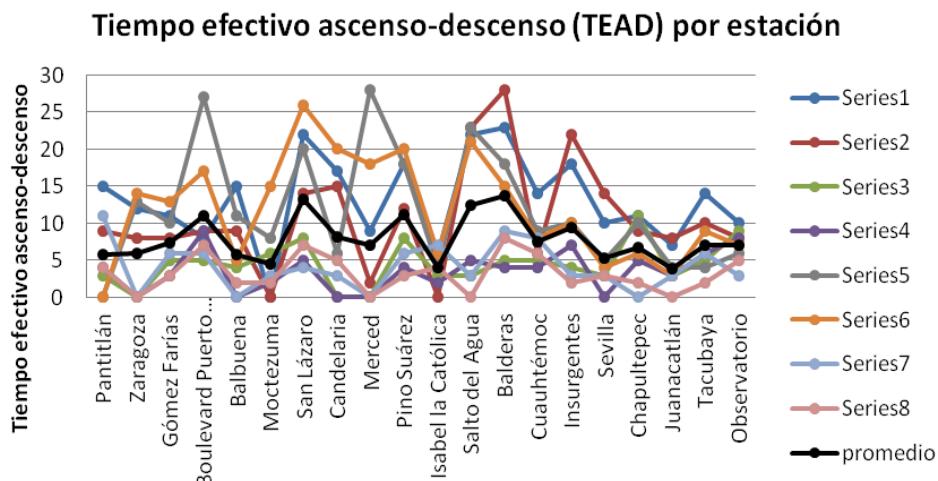
Gráfica 6.2. Histograma de la diferencia entre el tiempo fijo de puertas abiertas de 24 segundos y el tiempo efectivo de ascenso-descenso.

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, en este caso el de los más conflictivos. El

## Capítulo 6

crecimiento de proporción de las frecuencias hacia el límite de 24 segundos 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 los que indica que hay muchas ocasiones, en proporción a la muestra, en donde no suben ni bajan pasajeros considerando el tiempo efectivo de ascenso-descenso.

El tiempo de 24 segundos es adecuado de manera general, aunque se podría considerar un tiempo variable por estación considerando los patrones de flujo de los pasajeros y el horario. En la Gráfica 2 se muestran los tiempos efectivos de ascenso-descenso por estación.



Gráfica 6.3.TEAD para estaciones dirección Pantitlán-Observatorio.

Los puntos máximos de la Gráfica 6.3 son una cota superior para asignar un tiempo de puertas abiertas razonable por estación. La variabilidad depende del flujo de pasajeros, en este caso, las estaciones conflictivas superan los 25 segundos de tiempo efectivo.

La Tabla 6.1 muestra una comparación entre los posibles tiempos que puede tomar el tiempo de puertas abiertas (TPA). Se propone como tiempos óptimos por estación el *TEAD promedio* más una tolerancia de 3 segundos

para que los usuarios no estén presionados por los tiempos establecidos. En la actualidad el tiempo total invertido de puertas abiertas en las carreras se encuentran entre el rango de 6.15 a 11 minutos, la suma de los tiempos máximos de todas las estaciones arrojan un tiempo de aproximado de 20 min.

Estación	TEAD máximo + tolerancia 3 seg	TPA Fijo	TPA Real Promedio	TPA Real Máximo
Pantitlán	18	24	36.8	107
Zaragoza	17	24	17.8	23
Gómez Farías	16	24	45.6	170
Boulevard Puerto Aéreo	30	24	23.6	36
Balbuena	18	24	26.8	58
Moctezuma	18	24	18.2	30
San Lázaro	29	24	18.4	29
Candelaria	23	24	15.8	24
Merced	31	24	71.2	126
Pino Suárez	23	24	43.4	138
Isabel la Católica	10	24	16.6	19
Salto del Agua	26	24	46.2	137
Balderas	31	24	29.8	69
Cuauhtémoc	17	24	18	28
Insurgentes	25	24	22.8	49
Sevilla	17	24	17.4	24
Chapultepec	14	24	15.2	20
Juanacatlán	11	24	13.2	18
Tacubaya	17	24	23.2	46
Observatorio	13	24	15.2	19
<b>Tiempo total invertido (min)</b>	<b>6.73</b>	<b>8.00</b>	<b>8.92</b>	<b>19.50</b>

Tabla 6.1. Comparación de tiempos para los intervalos de puertas abiertas. Los TPA reales son medidas de carreras completas tomadas a lo largo del día (horarios pico y no pico). Los valores en amarillo muestran los intervalos del TEAD que superan los 24 segundos fijos que propone la administración del metro.

## Capítulo 6

Con esta información se propone que el tiempo de puertas abiertas se regule a partir de la afluencia de pasajeros a través de un banco de datos que vaya ajustando los rangos de tiempo por estación y por hora del día. Esta estrategia mantendría un intervalo óptimo de tiempos de puertas abiertas, aunque sólo con respetar el tiempo programado de 24 segundos sería un gran avance.

Esta estrategia debe estar ligada con un mecanismo de regulación de ascenso y descenso de pasajeros para que el tiempo programado de puertas abiertas sea invertido satisfactoriamente. A continuación se presenta la primera propuesta.

### **6.4 Estrategia. “Señalamientos guía en plataforma para ascenso y descenso”**

Se ha observado, a través de las videogramaciones de la investigación, que los usuarios forman flujos de entrada y de salida en el proceso de ascenso y descenso; incluso en ambientes sumamente saturados, se convierte en una estrategia para disminuir la fricción.

Existen cuatro posibles casos que dependen de la afluencia de pasajeros, estos son:

1. La formación de un flujo central para bajar y dos laterales para subir.
2. La formación de 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 2 y 3 son equivalentes, el caso 4 se desarrolla en las terminales y el caso 1 muestra 3 flujos simultáneos en algún momento.

Estos casos surgen cuando se presenta cierto rango 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. Existen casos

desorganizados donde hay ascensos y descensos intercalados incluso cuando hay poca saturación.

A continuación se describen los procesos de cada caso en una situación de organización.

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

1. Esta dinámica surge en ambientes saturados ya que los usuarios de la plataforma esperan distribuidos homogéneamente en la plataforma.
2. Los usuarios en el interior del vagón se reacomodan para descender. El tren arriba a la estación e inicia la apertura de puertas.
3. Los usuarios de la plataforma que se encuentran enfrente de la puerta se mueven muy poco para permitir el descenso.
4. Los usuarios en el interior del vagón que se disponen a bajar aprovechan el primer momento de apertura de puertas para bajar, esto hace que el primer pasajero empiece a formar un camino temporal abriendo paso entre los usuarios de la plataforma.
5. Los usuarios de la plataforma se hacen a un lado, en pequeña proporción, para dejar pasar a los usuarios que descienden.
6. Los usuarios del vagón van reforzando el camino provisional.
7. Los usuarios de la plataforma no respetan el señalamiento “Antes de entrar permita salir” y simultáneamente suben por los extremos de las puertas.
8. Se forman 3 flujos, uno central de descenso y 2 laterales de ascenso.
9. Los usuarios que obstruyen los extremos de las puertas en el interior del vagón pueden ser empujados.
10. Al bajar todos los usuarios por la parte central los dos flujos de los extremos se unifica.
11. Se forma un solo flujo de ascenso.
12. En caso de que se sature el vagón, los usuarios quedan en la plataforma en espera del siguiente tren.
13. En tanto no parta el tren, hay pasajeros que intentarán subir aún y cuando el vagón este en su punto máximo de saturación.

### Caso 2 y 3. Formación de un flujo para subir y uno para subir

1. Esta dinámica surge en ambientes medianamente saturados ya que los usuarios de la plataforma se cargan hacia algún lado de la puerta, depende de la posición donde quedó la puerta al arribar el tren.
2. Los usuarios que descienden forman un flujo que es orientado hacia la izquierda o la derecha, considerando el flujo de personas que desea subir, en su defecto, los pasajeros que bajan ocupan toda la puerta pero en algún momento empiezan a subir los usuarios de la plataforma sin esperar completamente el descenso.
3. Simultáneamente se forman los dos flujos.
4. Cuando el flujo de descenso finaliza el de ascenso ocupa toda la puerta.

### Caso 4. Formación de un flujo único para subir o para bajar

1. Esta dinámica surge en las terminales ya sea la de inicio o la final, el proceso de ascenso y descenso es limpio y no hay obstrucciones.

Usando esta información se plantea un mecanismo de regulación que ordene y fomente la formación de estos flujos.

El objetivo principal es la optimización de los tiempos de ascenso y descenso y disminuir la fricción entre los pasajeros para elevar la calidad del viaje.

Específicamente, los tiempos empleados en el proceso de ascenso y descenso deben ser separados para disminuir la fricción y formar dinámicas tipo terminal. 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 la gráfica del tiempo efectivo de ascenso y descenso muestra la suma del número de pasajeros que suben y bajan ya que en la situación actual los procesos ocurren de manera simultánea y no es posible separalos. En algunas ocasiones se desarrolla de manera intercalada

dependiendo de la desorganización de los usuarios. También muestra que las terminales tienen de los mejores tiempos ya que solo suben o solo bajan.

Para implementar esta estrategia se debe contar con una señalización adecuada en el piso de la plataforma, además de, estacionar el tren siempre en la misma posición para que los señalamientos queden alineados. En la Figura 6.1 se representa esquemáticamente la distribución general de la estrategia.

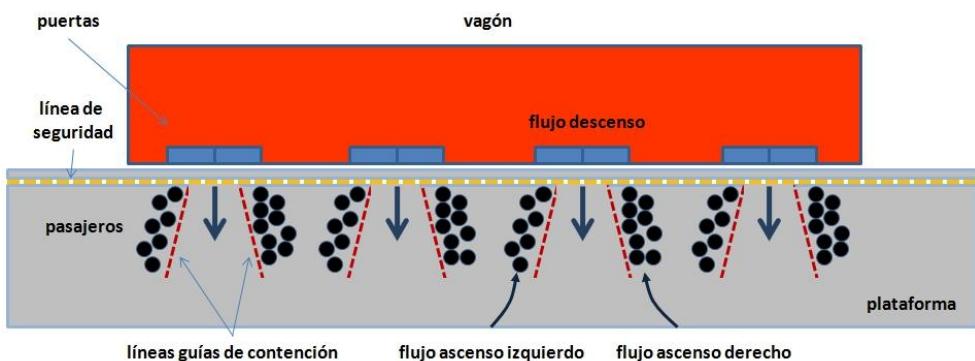


Figura 6.1. Esquema general de la estrategia de señalamientos guía.

Para implementar esta estrategia se necesitan los siguientes requerimientos.

## Requerimientos

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.
2. Instalar las líneas guía de contención en la posición correcta de tal forma que las guías queden exactamente en las puertas.
3. Para optimizar el tiempo de viaje y evitar los casos de “pasajeros necios” se debe acotar el tiempo de puertas abiertas a través de la estrategia de la sección anterior “Regulación de intervalos de tiempo de puertas abiertas”.

## Capítulo 6

4. El cierre de puertas debe ser con una velocidad “normal” para evitar las obstrucciones por parte de los usuarios y que queden oprimidos por las puertas. Si se hace de manera rápida es más probable que los usuarios que no se hayan acomodado (asumiendo que van a hacer lo posible por subir) obstruyan la puerta.
5. 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. Los beneficios de aplicar esta estrategia repercuten principalmente en la calidad de viaje de los usuarios, se pretende disminuir los tiempos efectivos de ascenso y descenso y la fricción entre ellos.

### Detalles de la simulación computacional

Se construyó en el simulador la estrategia “Señalamientos guía en plataforma para ascenso y descenso” para comparar la dinámica de la situación actual del metro con la nueva propuesta.

La dinámica de 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 subir, de esta manera tenemos un caso extremo donde el mismo número de pasajeros desea subir y desea 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. Es útil hacer el experimento a través de la simulación ya que estos casos extremos son difíciles de ver en la realidad.

En la Imagen 6.2 se presentan los elementos de la simulación, los pasajeros que se encuentran del lado izquierdo de la puerta son identificados con color rojo y los que se encuentran del lado derecho de color azul. Los pasajeros en el interior del vagón son de color blanco. La dirección que toman los

pasajeros que salen por la puerta 1 y 2 es hacia la izquierda y los que salen por las puertas 3 y 4 es hacia la derecha.

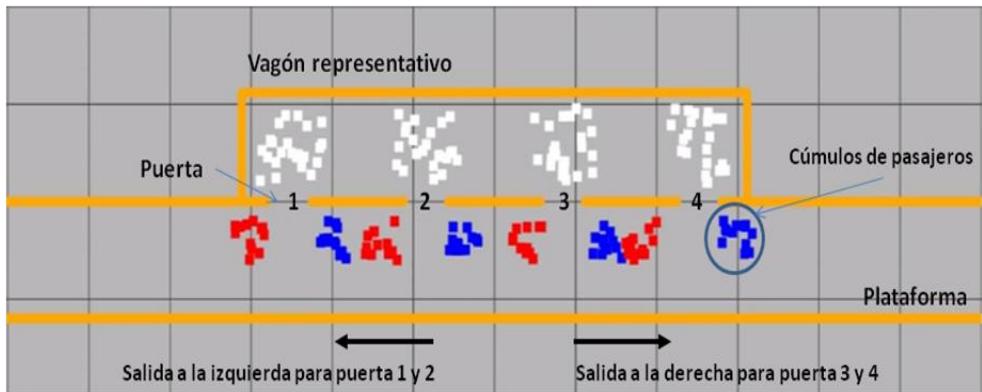


Figura 6.2. Elementos de la simulación.

El modelo tiene varios parámetros 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 parámetros<sup>12</sup> 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, tomados como velocidad base 2.4 metros en 3 segundos, el cual es el tiempo que tarda una persona en recorrer el ancho del vagón (de puerta a puerta).

A continuación se muestra la secuencia de imágenes de una corrida de la simulación.

---

<sup>12</sup> El simulador cuenta con el archivo config.xml el cual contiene la definición de los parámetros.

## Capítulo 6

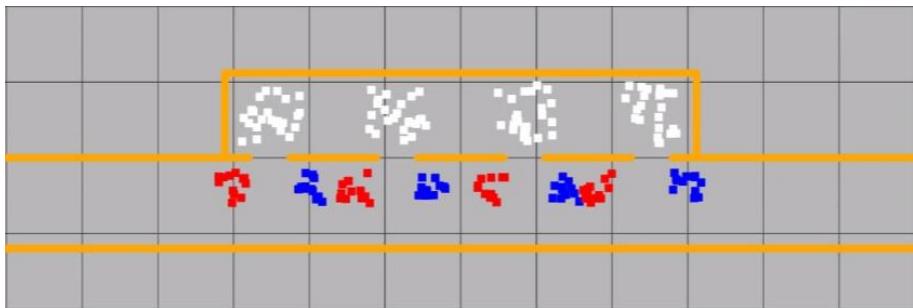


Figura 6.3. Inicialización de la simulación.

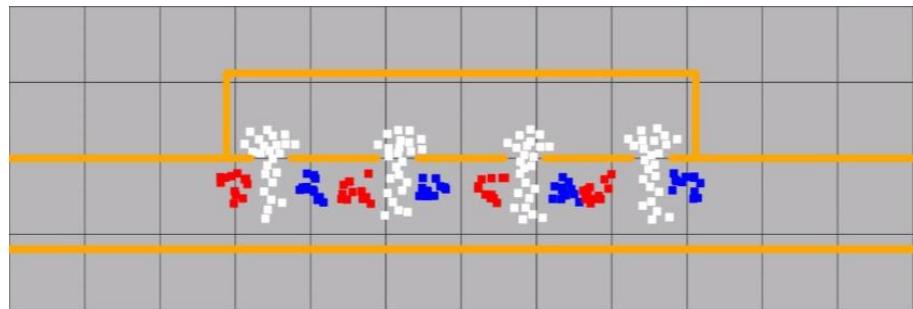


Figura 6.4. Los pasajeros en azul y rojo ubicados en la plataforma esperan a que salgan los pasajeros del interior del vagón. La posición de los pasajeros es parte de la estrategia, esto hace que no haya nadie que obstruya la salida.

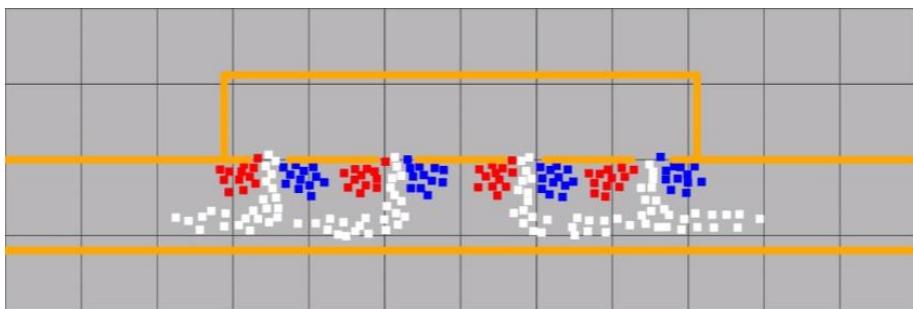


Figura 6.5. Los pasajeros en azul y rojo se disponen a subir, se acaba el tiempo de “cortesía” debido a que los pasajeros en blanco ya están por salir completamente.

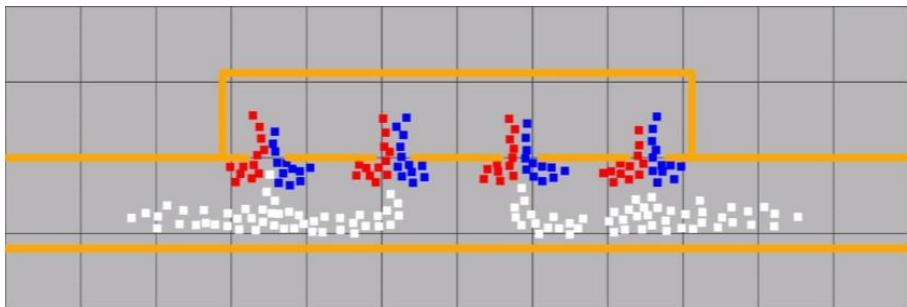


Figura 6.6. Se forman dos flujos en el ascenso, los mismos que se han detectado en los videos. Esta configuración es óptima ya que se utiliza todo el espacio de la puerta y la organización hace que se disminuya la fricción.  
Los pasajeros en blanco ya han salido.

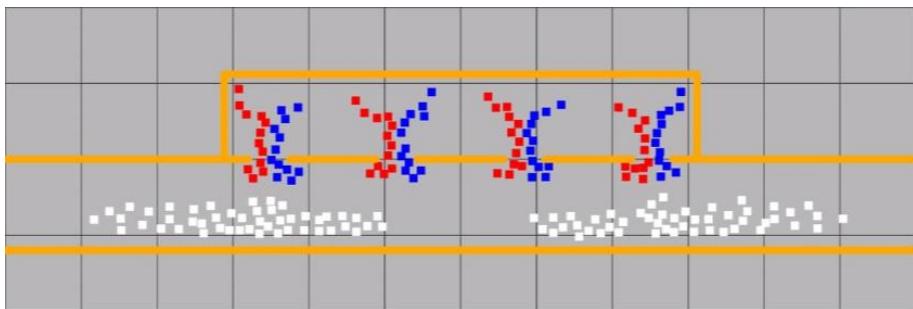


Figura 6.7. Debido a la estrategia de cada usuario, los pasajeros se cargan al lado preferente, es decir, los pasajeros que entran por la izquierda se van a la izquierda y los que se cargan a la derecha se quedan en la región derecha. Esta dinámica se observa en los videos, las personas que entran por la derecha mantienen su dirección aún cuando hay saturación.

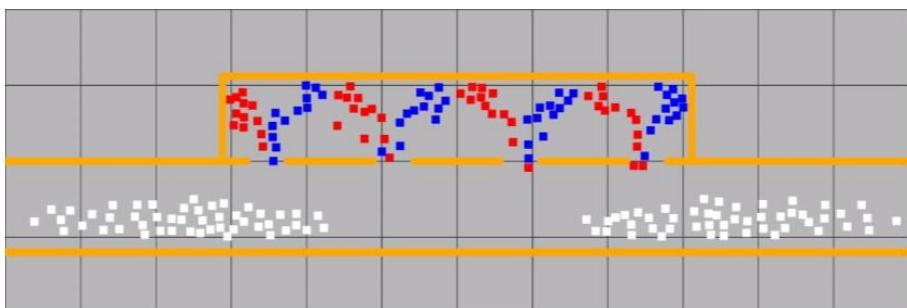


Figura 6.8. Los usuarios del interior del vagón se empiezan a repartir por el espacio

## Capítulo 6

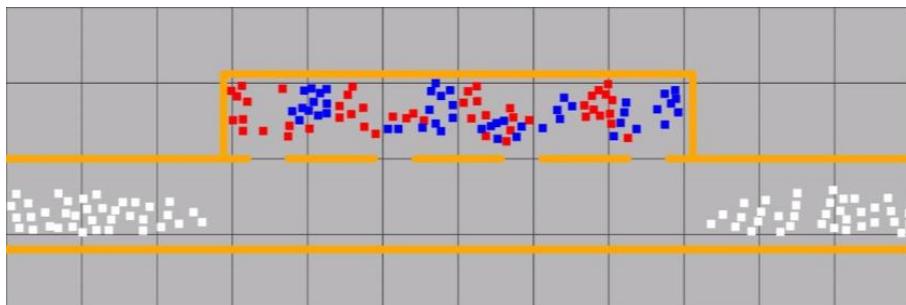


Figura 6.9. En esta etapa el proceso de ascenso y descenso ha terminado. Inicia el proceso de asignación de lugares por medio de zonas preferenciales.

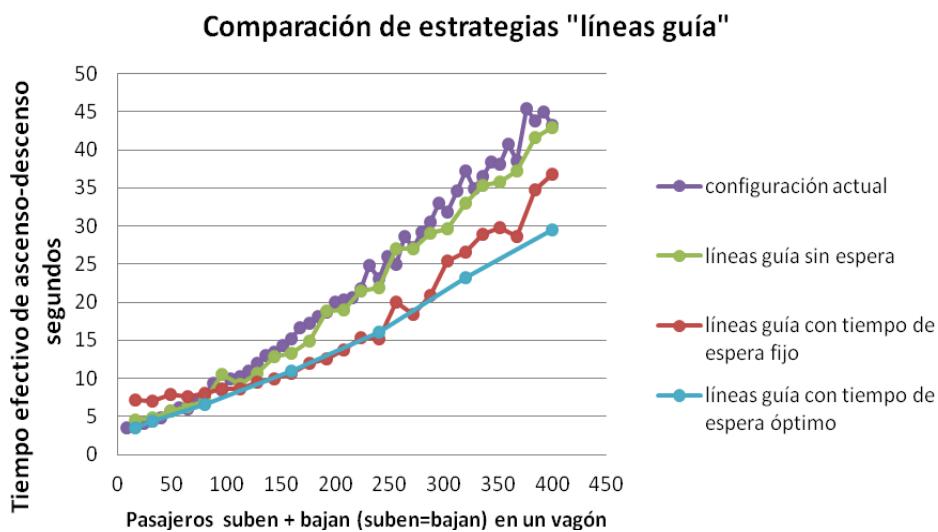
Un parámetro importante es el tiempo de espera de los pasajeros para iniciar el proceso de ascenso, si no es el suficiente chocarán con los que están bajando y habrá mucha fricción, por consiguiente, se incrementará el tiempo efectivo de ascenso y descenso. Para observar como impacta este comportamiento en los tiempos efectivos de ascenso y descenso se realizaron un conjunto de simulaciones variando el tiempo de espera.



Grafica 6.4. Tiempo de espera en plataforma por parte de los pasajeros en el proceso de ascenso-descenso.

Los experimentos de la Gráfica 6.4 se realizaron estableciendo 8 cúmulos de pasajeros en la plataforma de 10 pasajeros cada uno posicionados en los

extremos de las puertas y 4 cúmulos en el interior del vagón de 20 pasajeros cada uno, de esta manera suman 160 pasajeros en total, teniendo que, 80 pasajeros desean bajar y 80 pasajeros desean subir en total. El eje de las ordenadas muestra el tiempo de espera de los pasajeros de la plataforma, y eje de las abscisas el tiempo efectivo del proceso de ascenso-descenso involucrando al 98% de los pasajeros. 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, 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 usuario en el proceso de ascenso-descenso, alrededor de 3 y 5 segundos de espera los flujos de descenso ya se formaron, haciendo más difícil destruir el flujo; los usuarios tienen que subir por los laterales de la puerta, sin embargo en los primeros segundos el flujo de descenso no se ha formado y esto puede traer una gran desorganización (se observa en el pico alrededor del 1.5 segundos).



Gráfica 6.5. Comparación entre distintos tiempos de espera variando la densidad de pasajeros y la configuración actual.

## Capítulo 6

Para analizar si la estrategia propuesta puede mejorar los tiempos efectivos de ascenso y descenso se hace una comparación (Gráfica 6.5) con la modelación de la configuración actual sin regulación, donde hay un tiempo mínimo de espera por parte de los usuarios de la plataforma y la estrategia “antes de entrar permita salir” no es respetada<sup>13</sup>. Cada curva muestra el desempeño del tiempo efectivo de ascenso y descenso, la configuración actual es la que invierte mayor tiempo. Una configuración de líneas guía pero sin respetar el tiempo de espera es muy semejante a la configuración actual, aún siendo repartidos en los extremos de las puertas para permitir el descenso.

La otra estrategia (color rojo) es mantener a los usuarios por un tiempo determinado, se observa que retener a los pasajeros durante 4 o 5 segundos en la plataforma ayuda a que mejoren los tiempos. La curva óptima es cuando los pasajeros de la plataforma permiten el descenso total de los pasajeros. 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.

### 6.5 Propuestas de diseño para la señalización de “Líneas guía en plataforma”

La propuesta inicial de diseño para pintar las áreas de espera de pasajeros en la plataforma se muestran en la Figura 6.10 y 6.11.

---

<sup>13</sup> Los patrones de comportamiento y flujos que surgen en el sistema real son producto de la interacción local de los pasajeros motivados por un ascenso apresurado.

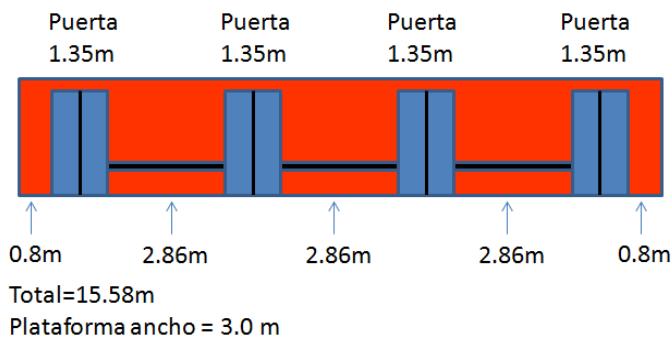


Figura 6.10. Dimensiones del vagón como referencia.

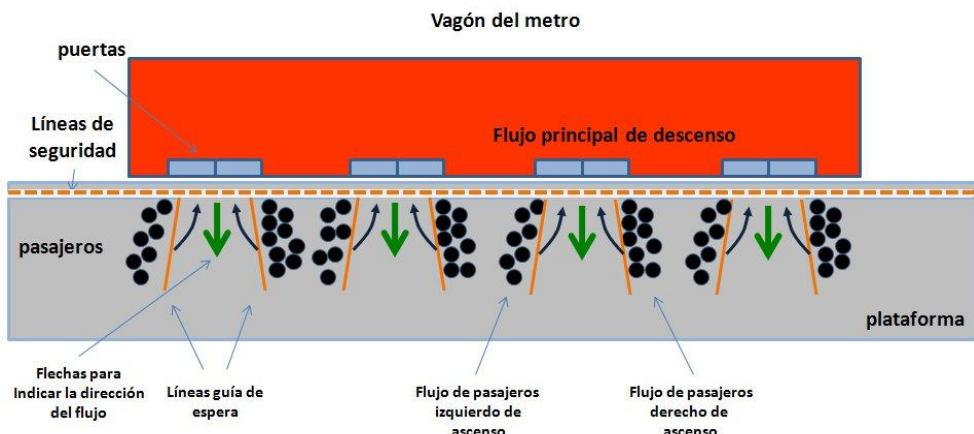


Figura 6.11. Propuesta de diseño para plataforma y vagón para guiar a los usuarios en el método de regulación “Señalamientos guía”.

La puerta mide 1.35m, cada línea guía deberá estar posicionada con un margen interior de 10 cm para tener un área de descenso de aproximadamente 1.15m, la inclinación de las líneas deberá ser de entre 80 y 90° respecto al ángulo interior, es decir, inclinaciones no muy pronunciadas. Se deben pintar las flechas para guiar a los pasajeros, una flecha principal en verde para indicar el área de salida y dos flechas laterales en azul para indicar el ascenso por los extremos de las puertas. Los colores utilizados deben ser acorde a las reglas institucionales del STC Metro.

## Capítulo 6

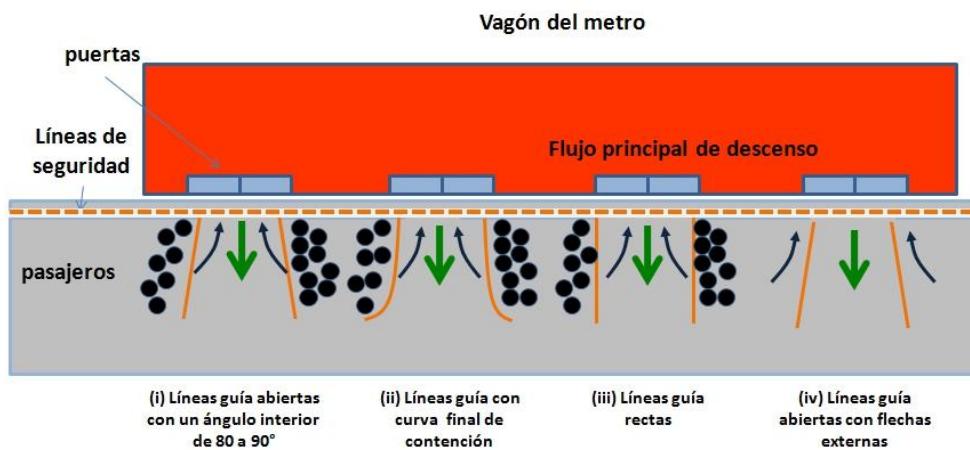


Figura 6.12. Diferentes propuesta de líneas guía. (i) Líneas guía abiertas, (ii) Líneas guía con curva final de contención, (iii) Líneas guía rectas (iv) Líneas guía abiertas con flechas de ascenso externas.

En la Figura 6.12 se muestran diferentes diseños para las líneas guías, deben contener alrededor de 8 a 10 personas por cada región en saturaciones medias, es decir, 20 personas por puerta. Se propone que las flechas estén pintadas en el área de ascenso-descenso (enfrente de la puerta) para que sean vistas por los usuarios.

El diseño de las líneas y flechas, considerando el color, grosor, ubicación espacial, forma y curvatura deben ser analizado por el Área de Medios de Comunicación del Metro para tener la mejor representación visual posible.

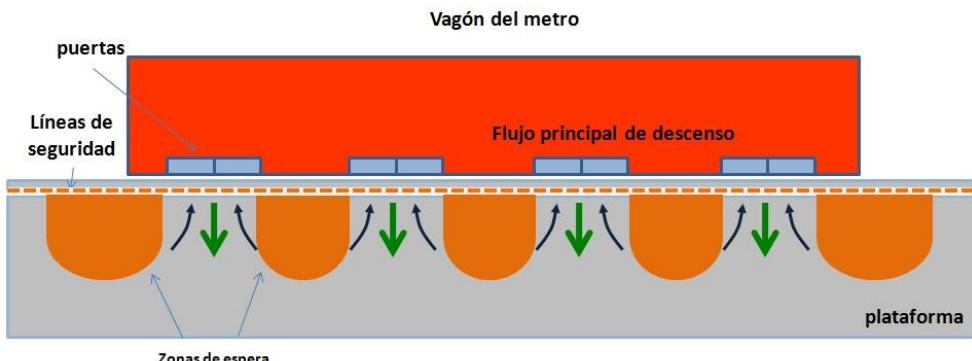


Figura 6.13. Propuesta de diseño involucrando zonas de espera para usuarios.

Las zonas en naranja, delimitan el área de espera de los pasajeros en la plataforma, las flechas en el exterior señalan la dirección del flujo para abordar por los laterales de las puertas; la flecha en verde señala la dirección de salida del vagón. La finalidad para que sean áreas pintadas en la plataforma es para que el usuario identifique con facilidad y rapidez las zonas donde no hay tanta aglomeración de pasajeros y pueda añadirse al grupo que está esperando. El usuario tendrá la opción de buscar zonas vacías o esperar en algún otro que ya tenga usuarios formados.

Existe una gran gama de posibilidades para el diseño de los señalamientos, el principal requerimiento es que sean sencillos visualmente y entendibles para los usuarios, también se debe considerar el presupuesto para implementar la señalización debido a la gran cantidad de puertas, 72 en total (ambos lados), y la gran cantidad de estaciones.

En la Figura 6.13 se representa otro esquema posible de áreas de espera, junto con un señalamiento en vagón para hacerlo más “orgánico”.

## Capítulo 6

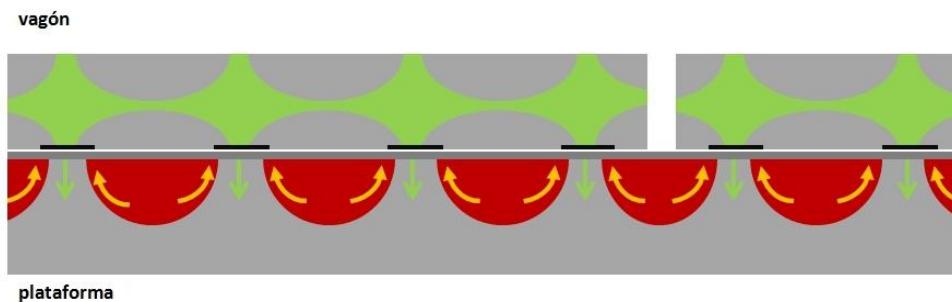


Figura 6.13. Propuesta de diseño para plataforma y vagón para guiar a los usuarios.

Las áreas en rojo, en forma de semicírculos, delimitan el área de espera de los pasajeros en la plataforma, las flechas en su interior señalan la dirección del flujo para abordar por los laterales de las puertas; la flecha en verde señala la dirección de salida del vagón. La finalidad para que sean áreas pintadas en la plataforma es para que el usuario identifique con facilidad y rapidez las zonas donde no hay tanta aglomeración de pasajeros y pueda añadirse al grupo que está esperando. El usuario tendrá la opción de buscar semicírculos vacíos o esperar en algún otro que ya tenga usuarios formados. Las zonas en verde señalan los flujos de salida del vagón.

A continuación se presenta el método de regulación “Puertas dedicadas de ascenso y descenso”.

### 6.6 Estrategia. “Puertas dedicadas de ascenso y descenso.”

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 vagón. En la Figura 6.11 se muestra una posible configuración, las dos puertas de los extremos sirven de entrada y las dos puertas del centro de salida.

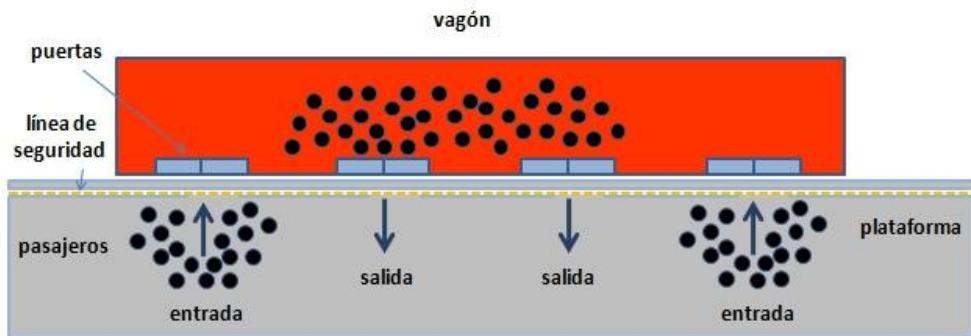


Figura 6.11. Estrategia “Puertas dedicadas”.

Al tener puertas exclusivas se tienen ascensos y descensos tipo terminal, al mismo tiempo se minimiza la fricción en el proceso de ascenso-descenso. A diferencia de la estrategia anterior, 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.

La dinámica del interior del vagón es sumamente estática, en promedio 4.2 pasajeros se cambian de una zona a otra, es decir, solo 4 pasajeros están dispuestos a moverse solo con la motivación de encontrar una posición más cómoda. Para implementar esta estrategia el 100% de los usuarios tendrían que moverse a las zonas “B” y “C” del vagón para salir.

Con ayuda del simulador se implementó un caso extremo del método de regulación. En la Figura 6.12 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.

## Capítulo 6

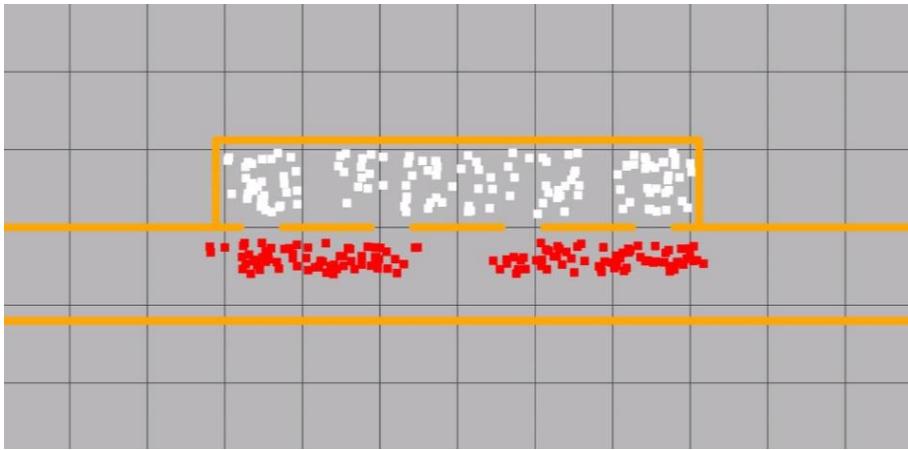


Figura 6.12. Condición inicial de pasajeros. Los pasajeros rojos están distribuidos casi homogéneamente sobre la plataforma, dejan un espacio libre en el centro del vagón para que los pasajeros blancos puedan descender.

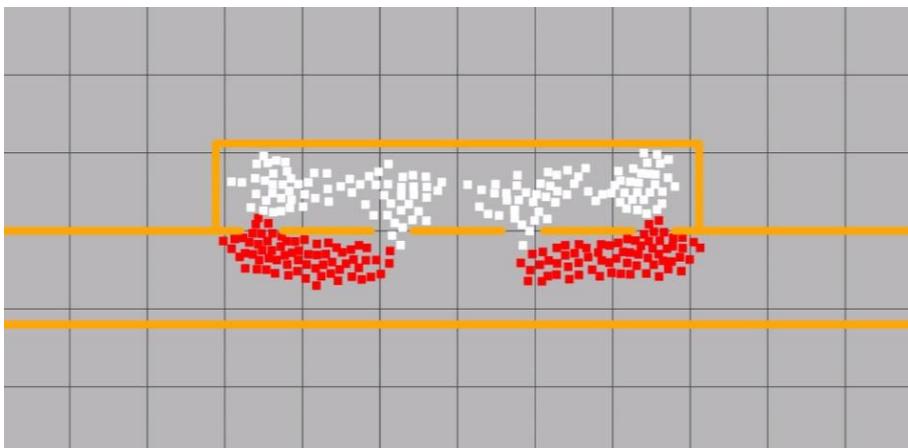


Figura 6.13. Los pasajeros empiezan a ubicarse en las entradas y salidas, los blancos se disponen a bajar, mientras que los rojos se disponen a subir.

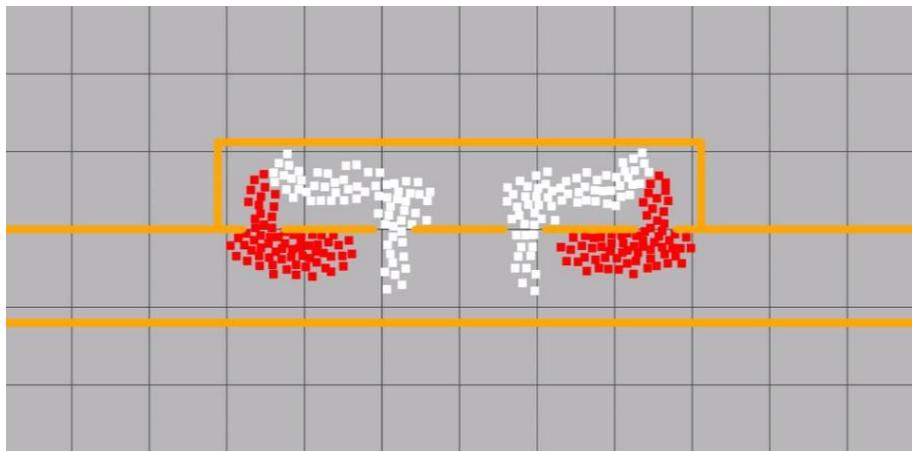


Figura 6.14. Se observa la formación de un flujo interno circular, los ascensos y descenso son “limpios” como en las terminales.

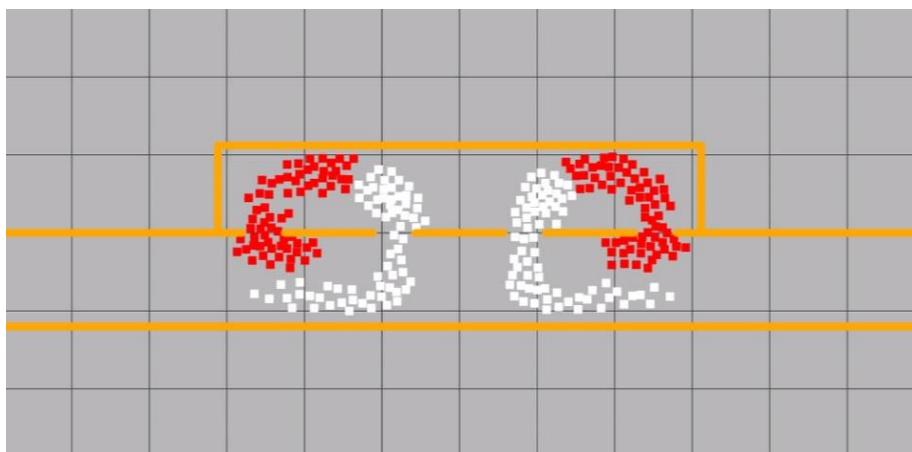


Figura 6.15. Los blancos libran el cúmulo de rojos que aún están por entrar.

## Capítulo 6

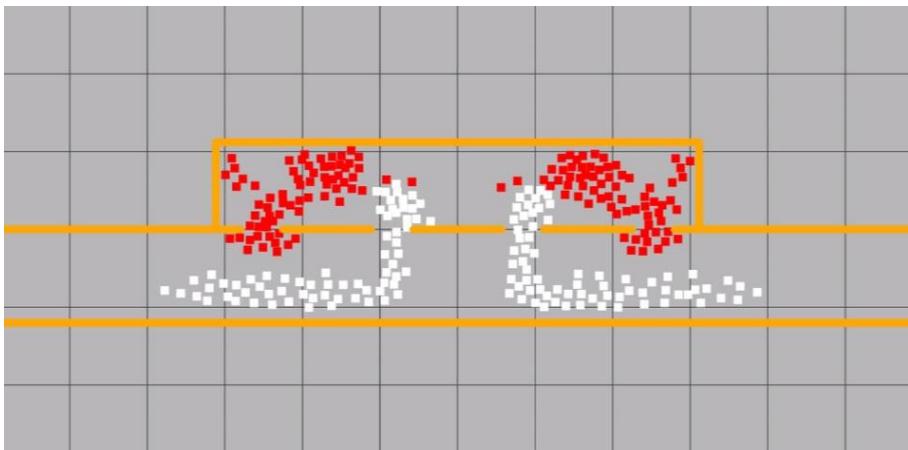


Figura 6.16. Los usuarios rojos empiezan a repartirse por los espacios vacíos del tren. Los usuarios blancos casi han terminado de salir del vagón.

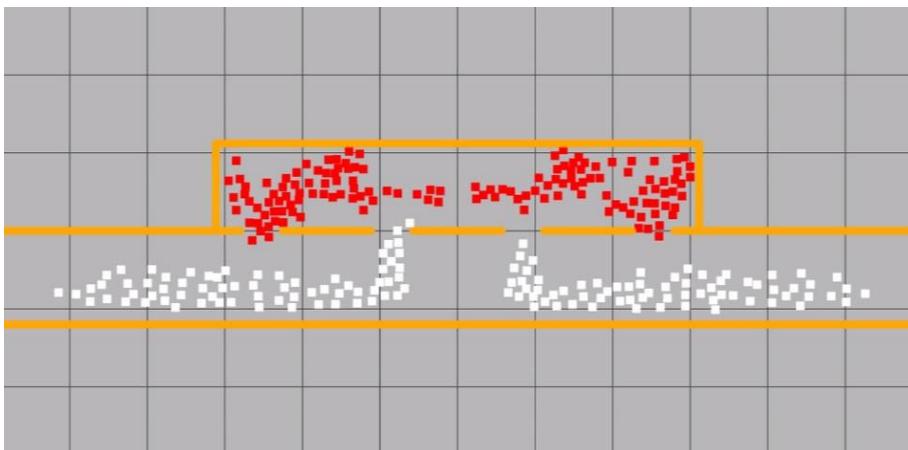


Figura 6.17. EL proceso de ascenso y descenso ha terminado.

Con este método existe un inconveniente debido a los patrones de viaje de la Línea, por ejemplo hay estaciones con una gran cantidad de descensos, supongamos que un 30% de los usuarios que suben en Pantitlán bajan en 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

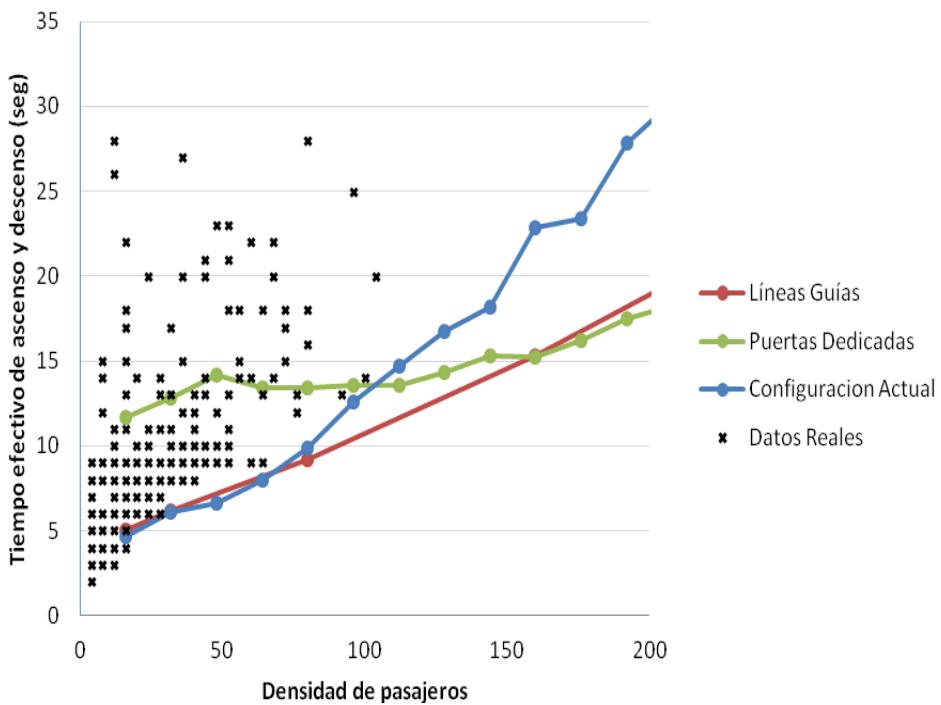
ascenso y descenso serán limpios. En grandes saturaciones, como lo es en las horas pico, la movilidad interna del vagón se verá reducida.

## 6.7 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.

En la Gráfica 6.6 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 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.

## Capítulo 6



Gráfica 6.6. Comparación de métodos de regulación con datos reales.

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 tiene el mejor rendimiento.

La configuración de líneas guía trabaja bien para todas las densidades. Para densidades muy pequeñas se comporta como el método actual, es lo que se debía esperar ya que no hay diferencia entre acomodar a los pasajeros en la zona de espera o enfrente de las puertas del vagón, el espacio de la puerta permite que simultáneamente se puedan crear dos flujos de entrada y salida. Para densidades altas empieza a notarse el beneficio de acomodar a los pasajeros en pequeños 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.

La implementación en el Sistema de Transporte Colectivo Metro es viable para la estrategia de “Líneas guía”, ya que con un mínimo de recursos se podría llevar a cabo. Con base en los videos, se ha observado que algunos de los pasajeros aplican estas estrategias de manera personal, esperan al siguiente tren, se posicionan donde saben que quedará el vagón y la puerta, se colocan en la parte lateral de la puerta, esperan que las personas bajen y después suben por el costado. No siempre es así ya que hay obstrucciones y fricciones.

La implementación de la estrategia “Puertas dedicadas” es un poco más costosa 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. 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, se supone, no habrá interferencias, como sucede en el trolebús o RTP.

## Capítulo 6

# Conclusiones

El estudio de ascenso y descenso de pasajeros realizado en el marco del Primer premio a la innovación tecnológica “Ing. Juan Manuel Ramírez Caraza” y Concurso de apoyos para el desarrollo de proyectos con aplicación al Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México 2014 requirió del planteamiento de una metodología para obtener, organizar y analizar los datos que se obtuvieron por medio de las videogramas. Esta metodología puede ser aplicada a cualquier línea del Metro o a cualquier sistema de transporte público.

Para entender cómo trabaja el STC, se requirió de la caracterización de los procesos en la vida del recorrido de los trenes y de la dinámica de pasajeros. Se planteó el estudio en dos escalas de organización, una en escala local donde básicamente se desarrollan los tiempos del proceso de ascenso-descenso de pasajeros, y una en escala global donde se desarrollan los tiempos y recorridos de los trenes.

Esta diferenciación nos ayudó a entender que cada nivel de organización debe ser regulada adecuadamente atacando los principales problemas de ineficiencia o las fuentes que causan retrasos en el tiempo de servicio.

Para que el STC esté regulado adecuadamente se tiene que analizar cada una de estas escalas de organización y encontrar los puntos débiles que se necesitan regular. Esto es de suma importancia porque las propuestas de regulación para una escala de organización impactan directamente a la otra.

## Conclusiones

Sin una regulación adecuada las propuestas planteadas no podrán impactar o mejorar el rendimiento al cien por ciento. En la escala global es imprescindible regular la frecuencia de paso de los trenes (headway) [11], [12], el cual está fuera del alcance de esta investigación, y para la escala local se puede regular el ascenso y descenso de pasajeros por medio de las estrategias propuestas en este trabajo.

Es de alta prioridad implementar estrategias de regulación de pasajeros en el Metro de la Ciudad de México. La propuesta de “Señalamientos guía en plataforma para ascenso y descenso” es una estrategia de regulación de bajo costo y alto impacto fundamentada en los estudios realizados en la Línea 1.

El funcionamiento de esta estrategia se basa en la dinámica de pasajeros del sistema, principalmente por la afluencia de usuarios que pueda presentar la línea. Se fomenta la creación y regulación de flujos de pasajeros para el ascenso y descenso. Los tiempos reales registrados en el estudio nos muestran que un ascenso y descenso ordenado, minimizan el tiempo de espera del tren en la estación, el cual impacta directamente en tiempo promedio de viaje.

Las simulaciones computacionales muestran que la implementación de los “señalamientos guía” puede disminuir de un 25 a un 30% los tiempos del proceso efectivo de ascenso y descenso con un comportamiento adecuado de los pasajeros. Los resultados también indican que no es necesario un perfecto orden por parte de los pasajeros para el buen funcionamiento del método. Es indispensable contar con cuatro segundos de espera por parte de los usuarios de la plataforma para que los flujos se desarrollen y pueda haber una disminución del tiempo efectivo de ascenso y descenso. También se propone que el tiempo de espera del tren sea ajustado según la estación y el horario, aunque se llegó a la conclusión que si se respetara el tiempo teórico de 24 segundos de permanencia del tren en la estación, ayudaría a mejorar el rendimiento del viaje total.

Es viable la implementación de la estrategia ya que los requerimientos son mínimos, principalmente se debe invertir en la colocación de los señalamientos en la plataforma y en una campaña de concientización de los usuarios para tratar de respetar los señalamientos y crear la cultura de “espera” en plataforma, de la misma manera los conductores de los trenes

## Conclusiones

deberán de ser precavidos en el momento de estacionar el tren en las estaciones para que los señalamientos no queden desfasados.

Estamos conscientes de que el proceso de adopción de nuevas estrategias puede ser lento, aunque un punto a nuestro favor es que ya muchos usuarios buscan las posiciones laterales de las puertas para subir por los extremos.

En general el trabajo de investigación muestra a través de varios indicadores el grado de rendimiento de la línea, por ejemplo, los histogramas muestran dispersiones y “colas” grandes debido a la inestabilidad del servicio, muestra las horas de mayor afluencia, y las cantidades aproximadas de pasajeros en vagones. Con toda esta información se tiene el fundamento para extender y aplicar la metodología a varias líneas y con datos duros planear y tomar decisiones para mejorar el rendimiento de las líneas del STC.

## Conclusiones

# Bibliografía

- [1] Cohen, J.E. (2003, noviembre). Human Population: The Next Half Century. *Science*, Vol. 302, No. 5648, pp. 1172-1175.
- [2] World metro database. URL <http://mic-ro.com/metro/table.html>. Consultado 2016/02/22.
- [3] Sistema de transporte colectivo. URL <http://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/cifrasoperacion.html>. Consultado 2016/02/22.
- [4] Sistema de Transporte Colectivo. *Análisis sobre diversas alternativas que modifican el sistema actual de ascenso y descenso en los trenes.*, (sin año).
- [5] Helbing, D. (1992). A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians. *Complex Systems*, pp. 391-415.
- [6] Helbing, D., Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, pp. 4282-4286.

## Bibliografía

- [7] Helbing, D., Molnár, P., 1998. Self-Organization Phenomena in Pedestrian Crowds. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/9806152>
- [8] Qi, Z., Baoming, H., Dewei, L. (2008). Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijin metro stations. *Transportation Research Part C*, (16), pp. 635-649.
- [9] Lee, J.Y.S., Lam, W.H.K., Wong, S.C., 2001. Pedestrian simulation model for Hong Kong underground stations. *IEEE Intelligent Transportation System Conference Proceedings*, pp. 554–558.
- [10] <http://pedsim.silmaril.org/>
- [11] Gershenson, C., Pineda L.A. (2009) Why Does Public Transport Not Arrive on Time? The Pervasiveness of Equal Headway Instability. *PLoS ONE* 4(10): e7292.
- [12] Gershenson, C. (2011) Self-Organization Leads to Supraoptimal Performance in Public Transportation Systems. *PLoS ONE* 6(6): e21469.

# Anexo 1. Manual del Simulador del Sistema de Transporte Colectivo Metro

La configuración del *Simulador del Sistema de Transporte Colectivo Metro* (SSTCM) se realiza por medio de dos archivos XML: escene1.xml y config.xml. Para usuarios de Windows es recomendable descargar el programa Notepad++ con el que pueden editar fácilmente archivos XML (<https://notepad-plus-plus.org/>).

## Archivo Config

En el archivo *config.xml* se declaran etiquetas que configuran los parámetros generales del simulador SSTCM referentes al modo de ejecución: modo interfaz gráfica o modo experimentos. En adición, se controlan los parámetros del modelo de fuerzas sociales (ver anexo A) que determinan el comportamiento de los peatones.

En las siguientes subsecciones se abordan las etiquetas correspondientes al archivo *config.xml*.

## Experiments

La etiqueta **experiments** especifica si el simulador se ejecuta en modo interfaz gráfica o en modo experimentos. En el modo interfaz gráfica se visualiza la interfaz gráfica del simulador donde se puede apreciar el escenario y el movimiento de los peatones que ascienden y desciden del vagón. En el modo experimentos se realizan experimentos en distintas

## Anexo 1

densidades de pasajeros sin mostrar la interfaz gráfica y los resultados se almacenan en el archivo *results.txt*.

La sintaxis de la etiqueta es: `<experiments graphic = "valor1"  
number_expe = "valor2"/>`

### Parámetros:

graphic: un valor de 1 indica que se ejecuta la interfaz gráfica. Por otro lado, un valor de 0 ejecuta el número de experimentos indicados en el parámetro number\_expe.

number\_expe: indica el número de experimentos a realizarse cuando el simulador está en modo experimentos. Los resultados son almacenados en el archivo *results.txt*.

### Ejemplo

Con la etiqueta: `<experiments graphic = "1" number_expe = "4"/>`

Se genera un archivo *results.tx* con el siguiente contenido:

N. T. Peatones	N. Entran	N. Salen	Entraron	Salieron	Permane- cieron	Tiempo
0	0	0	0	0	0	0.0
47	24	23	24	19	4	98
94	48	46	48	37	9	112
141	72	69	72	55	14	131.25
188	96	92	96	74	18	227

**N.T. Peatones:** número de peatones totales.

**N. Entran:** número de peatones del tipo que desean entrar al vagón.

**N. Salen:** número de peatones del tipo que desean salir del vagón.

**Salieron:** número de peatones que consiguieron entrar al vagón.

**Entraron:** número de peatones que consiguieron salir del vagón.

**Permanecieron:** número de peatones que no salieron del vagón.

**Tiempo:** tiempo en términos de pasos de simulación dividido entre la escala.

## Stop

La etiqueta **stop** especifica si el simulador se detendrá al alcanzar un determinado porcentaje de peatones salientes y entrantes al vagón.

La sintaxis de la etiqueta es: `<stop stp = "valor1" percentage = "valor2"/>`

### Parámetros:

**stp:** un valor de 1 indica que el simulador se detendrá cuando se alcance el porcentaje especificado en el parámetro **percentage**.

**percentage:** indica el porcentaje de peatones que deben entrar y salir del vagón para detener la simulación.

## Ejemplo

Con las etiqueta `<stop stp = "1" percentage = "0.6"/>` el simulador se detendrá cuando el número de peatones entrantes y salientes alcance el 60%, independientemente de si está en modo gráfico o en modo experimentos.

## Velocity

La etiqueta **velocity** especifica la velocidad en la que se desplazarán los peatones.

## Anexo 1

La sintaxis de la etiqueta es: `<velocity vel = "0.6" />`

### Parámetros:

vel: un valor de rapidez entre 0 y 1.

## Weights

La etiqueta weights especifica la influencia que tendrán los comportamientos de las fuerzas sociales (ver anexo A).

La sintaxis de la etiqueta es la siguiente: `<weights factorsocialforce = "valor1" factorobstacleforce = "valor2" factordesiredforce = "valor3" />`

### Parámetros:

factorsocialforce: indica la influencia de la fuerza de interacción.

factorobstacleforce: indica la influencia de la fuerza de repulsión con relación a los obstáculos.

factordesiredforce: indica la influencia de la fuerza de velocidad deseada.

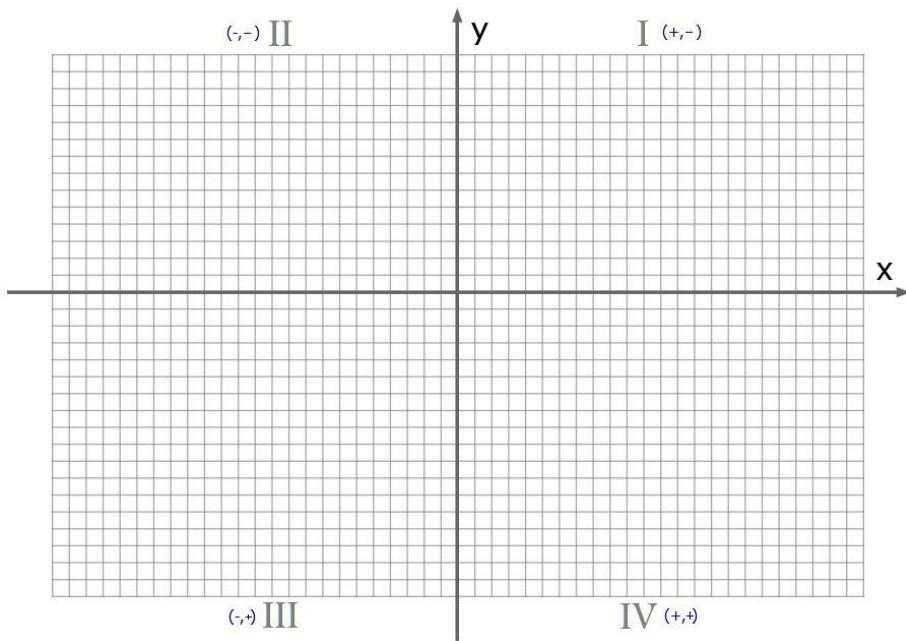
## Archivo Scene1

En el archivo *scene1.xml* se especifican etiquetas que configuran el escenario como lo son: muros, pasillos, cantidad de peatones, entre otros. Las instrucciones se especifican en dos tipos de espacios: **el espacio de coordenadas cartesianas y el espacio de coordenadas de celdas**.

## Espacio de coordenadas cartesianas

El espacio de coordenadas cartesiano implementado en el SSCTM es similar al espacio cartesiano estándar. Sin embargo, la diferencia radica en que el eje de las *y* está invertido. Es decir, los valores positivos de las *y* se dirigen hacia abajo y los valores negativos hacia arriba (ver figura 1).

Las etiquetas en el SSTCM que están relacionadas al espacio de coordenadas cartesianas son: *measures*; *scale*; *waypoint*; *agents* y *addwaypoint*; *obstacle*. En las secciones posteriores se explicarán en detalle dichas etiquetas.



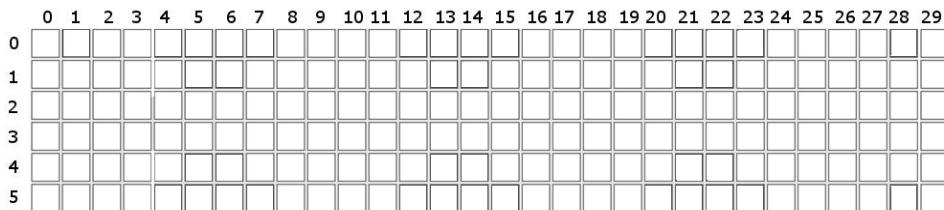
**Figura 1. Espacio de coordenadas cartesianas del simulador. El eje de las *y* está invertido. En este documento, para propósitos ilustrativos, en cada imagen donde se presente el espacio de coordenadas cartesiano el ancho y alto de las cuadriculas miden 2.5.**

## Espacio de coordenadas de celdas

El espacio de coordenadas de celdas se refiere a una cuadricula dividida en celdas que tienen una posición asignada. El espacio de coordenadas de celdas se encuentra dividido en dos resoluciones: resolución baja y

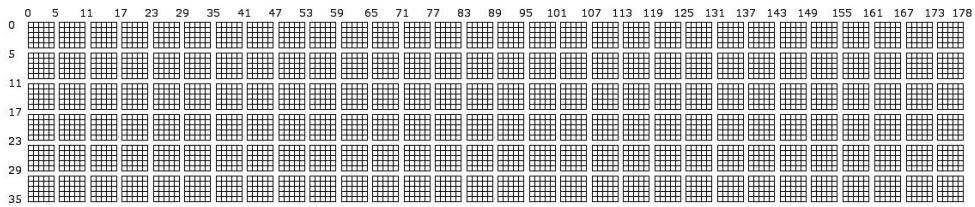
## Anexo 1

resolución alta. La figura 2 muestra un espacio de coordenadas de celdas en baja resolución de 30x6.



**Figura 2. Espacio de celdas en baja resolución de 30x6.**

La figura 3 muestra un espacio de coordenadas de celdas en alta resolución. En el espacio de celdas en alta resolución cada celda se encuentra subdividida en sub-celdas, en este caso 25 sub-celdas por cada celda de baja resolución. En adición, las sub-celdas están divididas por líneas horizontales y verticales de una sub-celda de ancho. En este caso, el espacio de celdas en alta resolución contiene una dimensión de 179x36 sub-celdas.



**Figura 3. Espacio de celdas en alta resolución compuesto por sub-celdas.**

## Measures

La etiqueta **measures** especifica el ancho y el alto del vagón en coordenadas cartesianas.

La sintaxis es la siguiente: **<measures width = "valor1" height = "valor2"/>**

## Parámetros:

**width:** ancho del vagón en coordenadas cartesianas.

**height:** alto del vagón en coordenadas cartesianas.

## Ejemplo

Con la etiqueta: `<measures width = "15.00" height = "5.00"/>`, se especifica un vagón como el que se muestra en la figura 4.

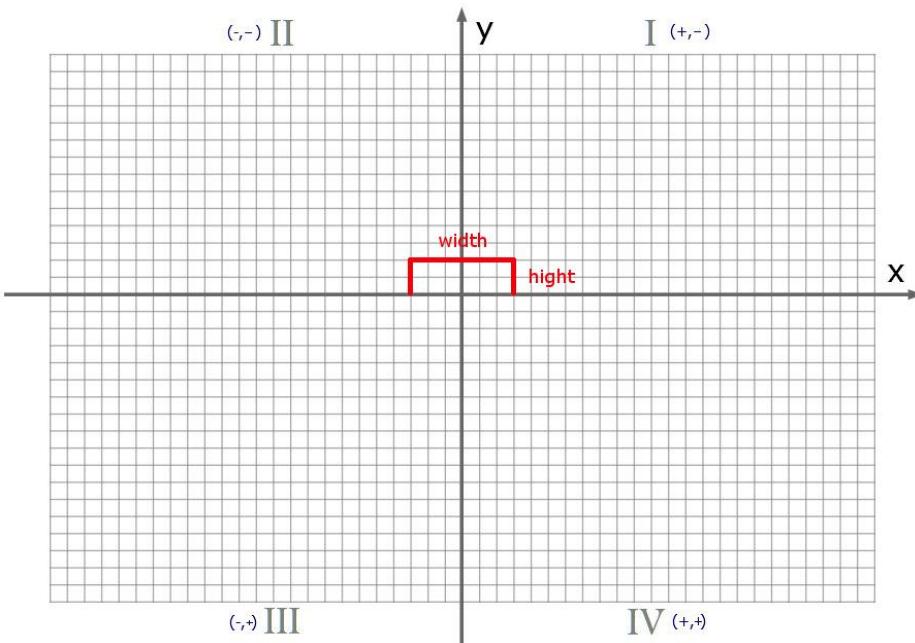


Figura 4. Ancho y alto del vagón.

## Scale

La etiqueta `scale` multiplica las medidas y posiciones en el espacio de coordenadas cartesianas que son especificadas en la escena.

La sintaxis de la etiqueta es: `<scale s = "valor" />`

### Parámetros:

`s`: multiplica las medidas y posiciones especificadas en coordenadas cartesianas en el archivo de la escena.

## Ejemplo

Con la etiqueta: `<scale s = "4" />`, el vagón especificado como `<measures width = "15.00" height = "2.5"/>`, se transforma en un vagón con medidas `width = 60` y `height = 20`.

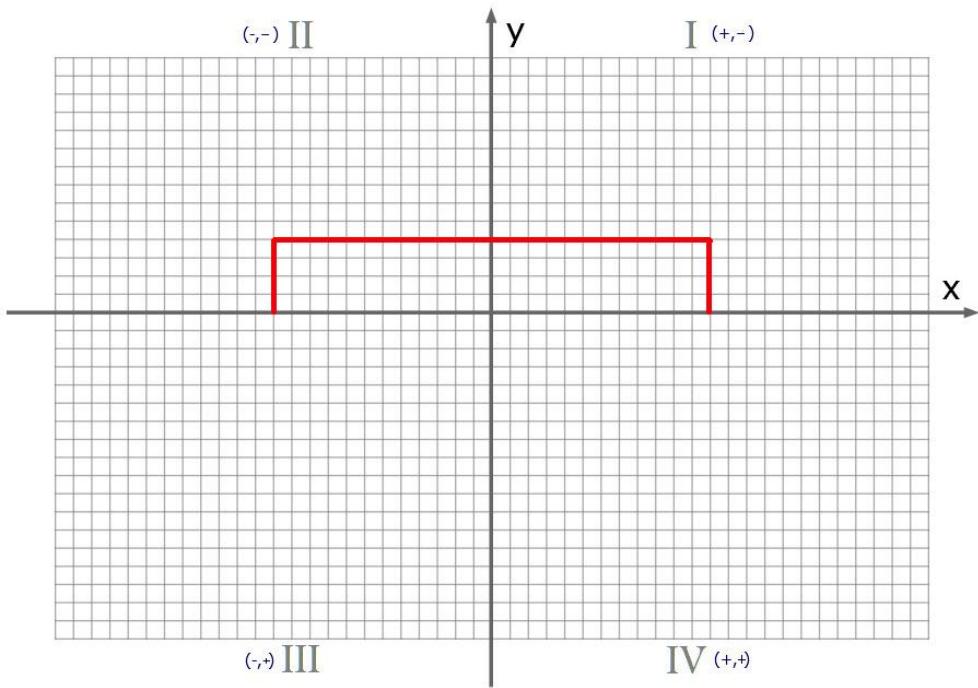


Figura 5. El vagón fue escalado en un factor de 4.

## Measures\_wagon

La etiqueta `measures_wagon` especifica el ancho y el alto del vagón en coordenadas de celdas.

La sintaxis de la etiqueta es: `<measures_wagon width = "valor1" height = "valor2" ratio = "valor3"/>`

**Entrada:**

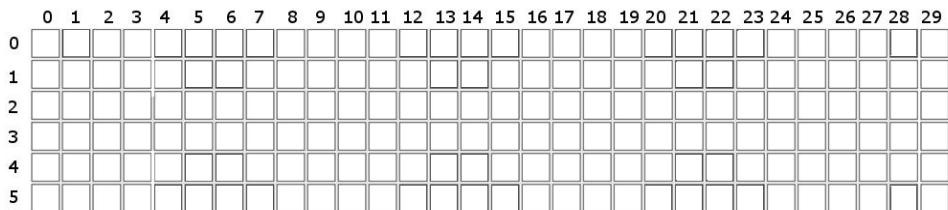
width: determina ancho del vagón en celdas.

height: determina alto del vagón en celdas.

ratio: determina la cantidad de sub-celdas dentro de una celda.

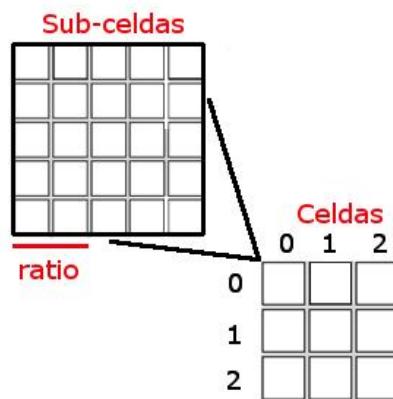
**Ejemplo**

Con la etiqueta: `<measures_wagon width = "30" height = "6" ratio = "2"/>`, se especifica un vagón en coordenadas de celdas en baja resolución como el que se muestra en la figura 6.



**Figura 6. Espacio de celdas en baja resolución especificado con la etiqueta measures\_wagon.**

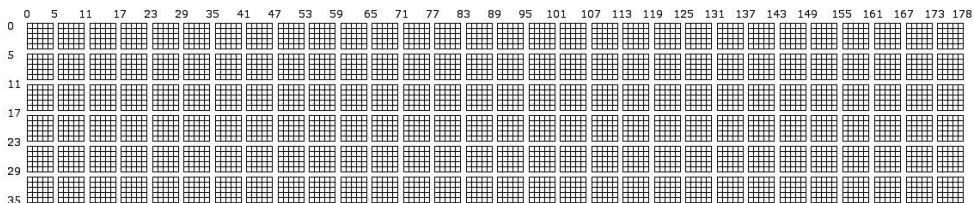
En adición, el parámetro `ratio = 2` especifica una resolución alta a nivel sub-celda dentro de cada celda. Por lo que en este caso, se crea una celda que contiene 25 sub-celdas como se muestra en la figura X.



**Figura 7. Un radio de dos crea 25 sub-celdas dentro de una celda.**

## Anexo 1

Por lo tanto, como resultado se tiene un vagón en alta resolución de una dimensión de 179x36 sub-celdas (ver figura 8), con adición de las sub-celdas que dividen.



**Figura 8.** Vagón en alta resolución especificado con la etiqueta `measures_wagon`.

### Calculate\_paths

La etiqueta `calculate_paths` especifica si es necesario calcular las rutas más cortas.

La sintaxis de la etiqueta es: <`calculate_paths cp = "valor1"`>

#### Parámetros:

`cp`: un valor de 1 indica que se deben calcular las rutas más cortas, por otro lado, un valor de 0 indica que no se calcularán las rutas. Los resultados son almacenados en el archivo `shortestPhats.xml`. Las rutas dentro de este archivo dotarán a los peatones de “inteligencia” porque le indicarán al peatón que se dirija por las rutas óptimas para llegar a un objetivo determinado dentro del vagón.

#### Ejemplo

<`calculate_paths cp = "1"`>

La ejecución del algoritmo A\* (ver anexo B), que calcula las rutas más cortas se ejecuta sobre el espacio de coordenadas de celdas en alta resolución. El cálculo de las rutas más cortas únicamente se realiza sobre los centros de las celdas a nivel sub-celda (ver sub-celdas en rojo de la figura 9). En el caso de un vagón con una dimensión de 30x6 hay 180 centros y cada centro se calcula consigo mismo y con todos los demás centros para

obtener la ruta más corta. Por lo tanto, en este caso se generan  $180 \times 180 = 32400$  rutas, que son almacenadas en el archivo *shortestPhats.xml*.

La Figura 9 muestra un escenario previamente configurado (incluye muebles), las sub-celdas coloreadas en rojo representan los centros de las celdas en alta resolución, y las sub-celdas pintadas de verde indican la ruta más corta entre esas sub-celdas (al igual que esa ruta, hay rutas para todas las demás subceldas). Cuando las rutas ya han sido previamente calculadas por el algoritmo A\* y almacenadas en el archivo, ya no es necesario recalcular las rutas nuevamente, por lo que *cp* debe asignarse en 0. Cuando se cambia la configuración del vagón, entonces deben volverse a calcular las rutas más cortas.

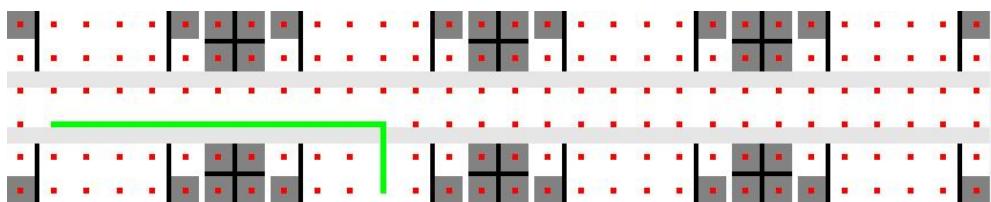


Figura 9. Configuración de un vagón en el espacio de celdas en alta resolución.

## Waypoint

La etiqueta *waypoint* especifica un punto objetivo que pudiera ser asignado a un agente (peatón) dentro del escenario en coordenadas cartesianas.

La sintaxis de la etiqueta es: `<waypoint id="nombre" x="valor1" y="valor2" r="valor3" />`

### Parámetros:

*id*: identificador del punto objetivo.

*x*: coordenada en el eje de las x en coordenadas cartesianas.

*y*: coordenada en el eje de las y en coordenadas cartesianas.

*r*: determina el tamaño del “punto” en coordenadas cartesianas.

## Ejemplo

Con las etiquetas: `<waypoint id="p1" x="10" y="-15" r="1" />` y `<waypoint id="p2" x="-5" y="7.5" r="2.5" />`, se especifican dos puntos objetivo en coordenadas cartesianas como se muestra en la figura 10.

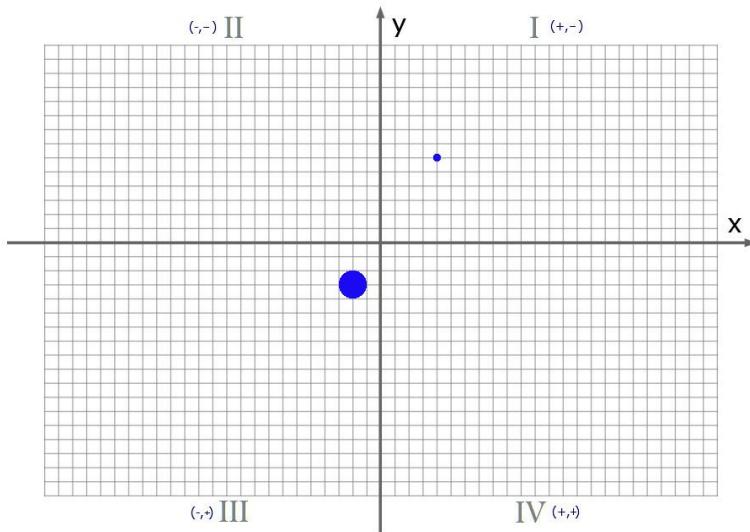


Figura 10. Dos puntos objetivo.

## Subdivision y quadrant

La etiqueta subdivision permite especificar un conjunto de cuadrantes dentro del vagón en coordenadas de celdas. Los cuadrantes son especificados mediante la etiqueta quadrant.

La sintaxis es la siguiente:

```
<subdivision>
    <quadrant id = "q1" x1 = "valor1" y1 = "valor2" x2 = "valor3" y2
    = "valor4"/>
    <quadrant id = "q2" x1 = "valor5" y1 = "valor6" x2 = "valor7" y2
    = "valor8"/>
    ...
    <quadrant id= "qn" x1= "valorj1" y1= "valorj2" x2= "valorj3" y2=
    "valorj4"/>
</subdivision>
```

## Parámetros:

`id`: nombre del cuadrante

`x1`: Coordenada  $x$  del primer punto que determinan el cuadrante en coordenadas de celdas en baja resolución.

`y1`: Coordenada  $y$  del primer punto que determinan el cuadrante en coordenadas de celdas en baja resolución.

`x2`: Coordenada  $x$  del segundo punto que determinan el cuadrante en coordenadas de celdas en baja resolución.

`y2`: Coordenada  $y$  del segundo punto que determinan el cuadrante en coordenadas de celdas en baja resolución.

## Ejemplo

Con las etiquetas:

```
<subdivision>
    <quadrant id = "q1" x1 = "0" y1 = "0" x2 = "6"
y2 = "5" />
    <quadrant id = "q2" x1 = "7" y1 = "0" x2 = "14"
y2 = "5" />
    <quadrant id = "q3" x1 = "15" y1 = " 0" x2 = "
22" y2 = "5" />
    <quadrant id = "q4" x1 = "23" y1 = " 0" x2 = 29
" y2 = "5" />
</subdivision>
```

Se especifican cuatro cuadrantes en coordenadas cartesianas como el que se muestra en la figura 11.

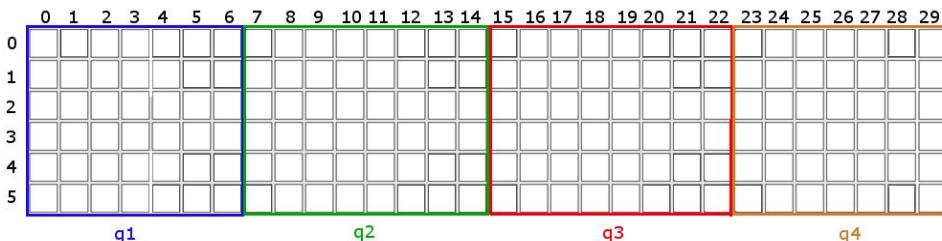


Figura 11: Cuadrantes creados con las etiquetas subdivisión y quadrant.

## Profile y point

La etiqueta `profile` permite definir el perfil de un agente (peatón) por medio posiciones especificadas mediante la etiqueta `point` que determinan los lugares de su preferencia en el espacio de celdas en baja resolución. La búsqueda se ejecuta dentro de un cuadrante previamente especificado.

La sintaxis es la siguiente:

```
<profile id = "nombre" qua = "nombre_del_cuadrante">
  <point x = "valor1" y = "valor2"/>
  <point x = "valor3" y = "valor4"/>
  ...
  <point x = "valorj1" y = "valorj2"/>
</profile>
```

Parámetros:

### Profile

`id`: nombre del perfil

`qua`: nombre de un cuadrante previamente especificado.

### Point

`x`: nombre del punto

`x1`: Coordenada x en coordenadas de celdas dentro del vagón.

`y1`: Coordenada y en coordenadas de celdas dentro del vagón.

## Ejemplo

Con las etiquetas:

```
<profile id = "pro1" qua = "q1" >
  <point x = "0" y = "0"/>
  <point x = "0" y = "5"/>
  <point x = "6" y = "0"/>
  <point x = "6" y = "5"/>
</profile>
```

Se especifica un perfil mediante un conjunto de posiciones en coordenadas de celdas en baja resolución como el que se muestra en la figura X.

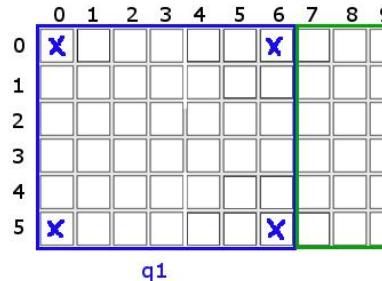


Figura 12. Un perfil de usuario en el que primero busca la posición (0,0), después (0,5) hasta llegar a (6,5). Si todas las posiciones están ocupadas, el peatón se quedará dónde está.

## Agents y addwaypoint

La etiqueta `agents` permite definir un conjunto de peatones aleatoriamente dentro de una región. En adición, mediante la etiqueta `addwaypoint` se agregan puntos objetivos al agente relacionados a la fuerza de velocidad deseada (ver anexo A). Si es un agente entrante primero ejecuta los `waipoints` asignados antes de entrar al vago. Por otro lado, si es un agente saliente ejecuta los `waypoints` asignados después de salir del vagón.

La sintaxis es la siguiente:

```
<agents x="valor1" y="valor2" n="valor3" dx="valor4"
dy="valor5" type = "valor6" colour =
"nombre_color" profile = "nombre_perfil" start =
"valor7">
<addwaypoint id="nombre_1" />
<addwaypoint id="nombre_2" />
...
<addwaypoint id="nombre_n" />
</agents>
```

## Parámetros:

### Agents

x: coordenada central  $x$  de la región donde se distribuyen los agentes de manera aleatoria en términos de coordenadas cartesianas.

y: coordenada central  $y$  de la región donde se distribuyen los agentes de manera aleatoria en términos de coordenadas cartesianas.

n: número de agentes dentro de la región.

dx: delta en  $x$  de la región.

dy: delta en  $y$  de la región.

type: tipo de agente, un valor de 1 especifica un agente entrante, un valor de 2 especifica un agente saliente.

color: color del agente, los colores permitidos son: *white, blue, red, yellow, green, cian y magenta*.

profile: asignación del perfil de peatón que ejecutarán los agentes entrantes.

start: tiempo de espera en el que los agentes comenzarán a realizar acciones.

### Addwaypoint

id: nombre del *waypoint* asociado al agente.

## Ejemplo

Con las etiquetas:

```
<agents x="17.5" y="-5.0" n="3" dx="2.5" dy="2.5"
type = "1" colour = "white" profile = "pro1" start
= "100">
<addwaypoint id="p1" />
<addwaypoint id="p2" />
</agents>
```

Se especifica un conjunto de agentes entrantes en coordenadas cartesianas y los waypoints que seguirá como se muestra en la figura 13.

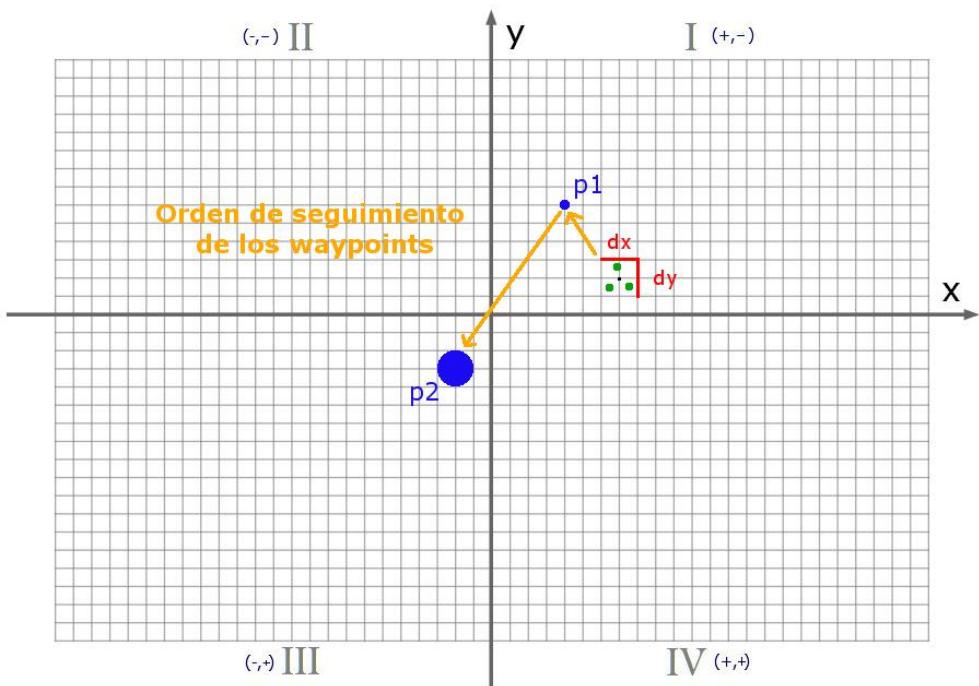


Figura 13. Agentes entrantes dentro de una región.

## Obstacle

La etiqueta `obstacle` especifica una línea en el espacio de coordenadas cartesianas con el que se pueden colocar muros o cercas para crear distintos tipos de escenarios.

La sintaxis de la etiqueta es: `<obstacle x1="valor1" y1="valor2" x2="valor3" y2="valor4" />`

### Parámetros:

`x1`: coordenada en el eje de las x del primer punto que determina la línea en coordenadas cartesianas.

`y1`: coordenada en el eje de las y del primer punto que determina la línea en coordenadas cartesianas.

## Anexo 1

$x_2$ : coordenada en el eje de las x del segundo punto que determina la línea en coordenadas cartesianas.

$y_2$ : coordenada en el eje de las y del segundo punto que determina la línea en coordenadas cartesianas.

### Ejemplo

Con las etiquetas: < obstacle  $x="-10"$   $y="-5"$   $x="10"$   $y="5"$  /> y < obstacle  $x="15"$   $y="-10"$   $x="35"$   $y="0"$  />, se especifican dos líneas en coordenadas cartesianas como las que se muestran en la figura X.

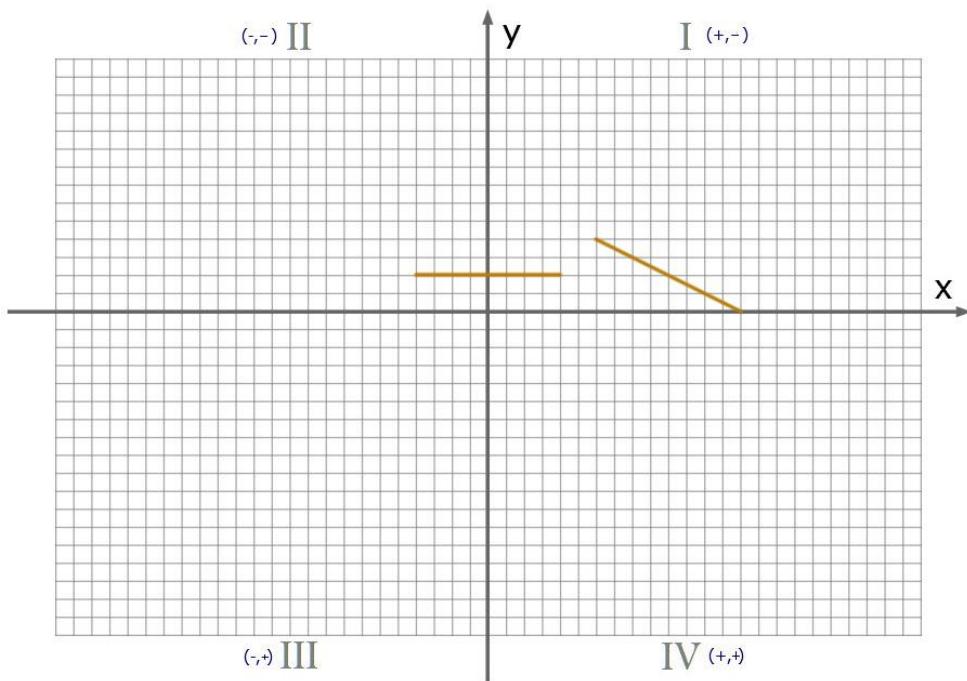


Figura 14. Dos obstáculos.

### Line

La etiqueta line especifica una línea en el espacio de coordenadas de celdas en alta resolución con el que se asigna el costo de moverse en esa línea. Solo se permiten líneas horizontales o verticales, en caso de líneas en diagonal no se tomaran en cuenta.

La sintaxis de la etiqueta es: `<line x1="valor1" y1="valor2" x2="valor3" y2="valor4" cost="valor5" />`

### Parámetros:

`x1`: coordenada en el eje de las *x* del primer punto que determina la línea en coordenadas de celdas en alta resolución (sub-celdas).

`y1`: coordenada en el eje de las *y* del primer punto que determina la línea en coordenadas de celdas en alta resolución (sub-celdas).

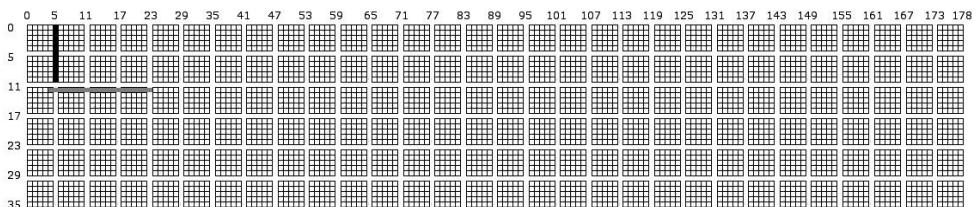
`x2`: coordenada en el eje de las *x* del segundo punto que determina la línea en coordenadas de celdas en alta resolución (sub-celdas).

`y2`: coordenada en el eje de las *x* del segundo punto que determina la línea en coordenadas de celdas en alta resolución (sub-celdas).

`cost`: el costo de pasar por esas celdas. Un valor de 0 significa que no tiene costo, un valor de 255 significa que no se puede pasar.

### Ejemplo

Con las etiquetas: `<line x1="5" y1="0" x2="5" y2="10" cost="255" />` y `< line x="4" y="12" x="23" y="12" cost="125" />`, se especifican dos líneas en coordenadas de sub-celdas como las que se muestran en la figura 15.



**Figura 15. Dos líneas en coordenadas de sub-celdas.**

## Area

La etiqueta area especifica un área rectangular en el espacio de coordenadas de celdas en alta resolución (sub-celdas) con el que se asigna el costo de moverse en esa área.

La sintaxis de la etiqueta es la siguiente: `<area x1="valor1" y1="valor2" x2="valor3" y2="valor4" cost="valor5" />`

### Parámetros:

x1: coordenada en el eje de las *x* del primer punto que determina el área en coordenadas de celdas en alta resolución (sub-celdas).

y1: coordenada en el eje de las *y* del primer punto que determina el área en coordenadas de celdas en alta resolución (sub-celdas).

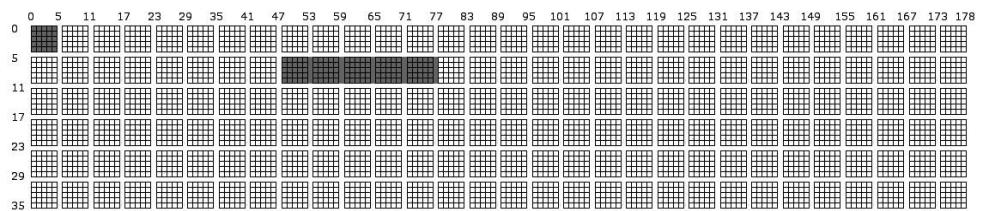
x2: coordenada en el eje de las *x* del segundo punto que determina el área en coordenadas de celdas en alta resolución (sub-celdas).

y2: coordenada en el eje de las *x* del segundo punto que determina el área en coordenadas de celdas en alta resolución (sub-celdas).

cost: el costo de pasar por esas celdas. Un valor de 0 significa que no tiene costo, un valor de 255 significa que no se puede pasar.

### Ejemplo

Con las etiquetas: `<area x1="0" y1="0" x2="4" y2="4" cost="100" />` y `<area x="48" y="5" x="77" y="11" cost="100" />`, se especifican dos áreas rectangulares en coordenadas de celdas de alta resolución (sub-celdas) como se muestran en la figura 16.



**Figura 16.** Dos áreas en coordenadas de celdas de alta resolución.

## Anexo 1

## Anexo 2. Modelo de Fuerzas Sociales

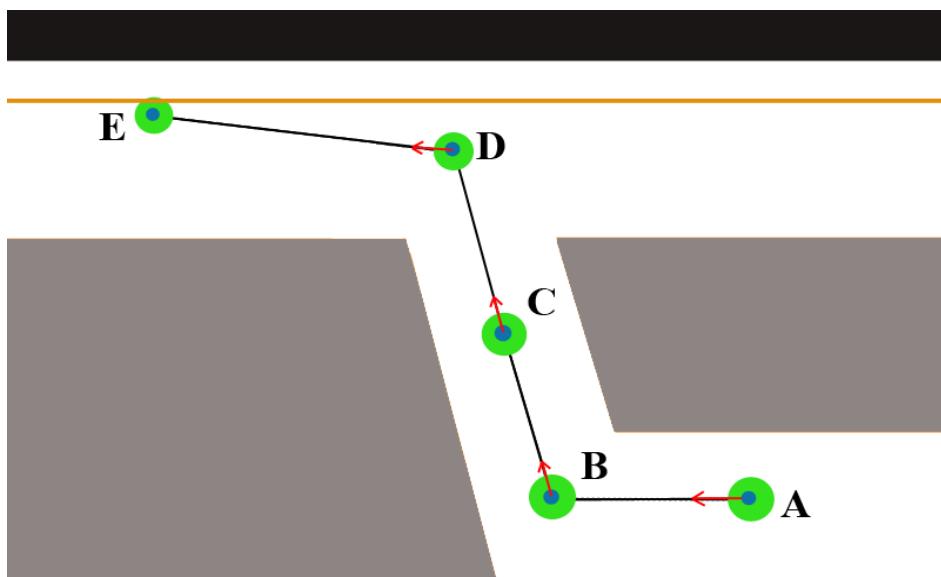
Los modelos de comportamiento de los peatones han encontrado un interés notable debido a que pueden proporcionar valiosas herramientas para el diseño y la planificación de zonas peatonales, estaciones de metro o ferrocarril, grandes edificios, centros comerciales, etc. Un modelo que ha mostrado mediante simulaciones por computadora patrones colectivos similares a los que se presentan en la realidad, en la interacción de los peatones, es el modelo de “Fuerzas Sociales”. Por lo tanto, es el modelo utilizado en este proyecto para simular a los peatones dentro de las estaciones del metro.

### El modelo de Fuerzas Sociales

En el modelo de “Fuerzas sociales” el movimiento de los peatones se describe como el resultado de la suma de fuerzas que reflejan las motivaciones internas de los individuos para realizar determinadas acciones. El comportamiento de cada peatón se describe por la aplicación de las fuerzas: **velocidad deseada, fuerza de repulsión de obstáculos y fuerza de interacción**. La **fuerza de velocidad deseada** describe la motivación del peatón en alcanzar una aceleración y dirección acorde al lugar que desea llegar. La **fuerza de repulsión de obstáculos** refleja el deseo del peatón de mantener una cierta distancia de los bordes (muros, vallas, barandales, etc.). La **fuerza de interacción** refleja el movimiento del peatón cuando se encuentra con otro peatón.

### Fuerza de velocidad deseada

El peatón quiere llegar a un determinado destino de la manera más cómoda. Por lo tanto, elige normalmente un camino sin rodeos, es decir, el camino más corto posible. Por lo que el camino se representa con la forma de un polígono con las áreas (*waypoints*) a las que se desea dirigir el peatón. Por ejemplo, en la figura 17 el peatón  $p$  se encuentra en el waypoint  $A$  de una estación del metro y desea llegar al waypoint final  $E$ . Un posible polígono para representar el camino es A, B, C, D y E. Por lo tanto, la dirección del **vector de velocidad** deseada se dirigirá desde la posición del área actual al punto más cercano de la siguiente área del polígono hasta llegar al destino final.

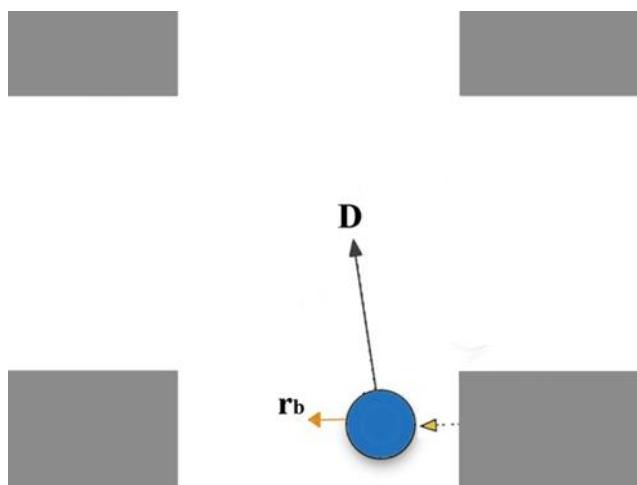


**Figura 17.** El polígono se encuentra representado por 5 waypoints de color verde, con un waypoint inicial  $A$  y un waypoint destino  $E$ . El peatón se representa mediante un círculo azul y el vector de velocidad deseado por una flecha roja.

## Fuerza de repulsión de obstáculos

El movimiento de un peatón  $p$  mantiene una cierta distancia de los muros u otros lugares donde haya la posibilidad de lastimarse. Esto se traduce en influencias repulsivas que pueden ser representadas por cantidades vectoriales

Por ejemplo, en la Figura 18 se muestra un peatón  $p$  de color azul que al percibir la cercanía del borde de la pared genera una fuerza repulsiva  $r_b$ . Por lo tanto, las fuerzas de repulsión contribuyente a que el peatón se aleje de los bordes.



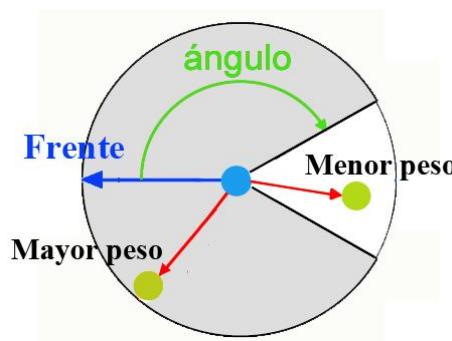
**Figura 18.** El agente  $p$  está coloreado de color azul. El vector de repulsión  $rp$  tiene como objetivo alejarse de los peatones y el vector repulsivo  $r_b$  alejarse de la pared.

## Fuerza de interacción

Cuando los peatones se desplazan cambian su velocidad cuando se encuentran con un peatón que está detenido o en movimiento para esquivarlo. Para más detalles de cómo fue modelada la fuerza de interacción consultar el artículo: *Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds*.

## Suma de Fuerzas

Cada peatón tiene una “zona de visión” que se aplica a las fuerzas para simular que un peatón le da menor importancia a situaciones que se encuentran detrás de él. Los peatones y objetos que se encuentren en dentro de la zona de visión recibirán mayor importancia en la aplicación de la fuerzas (ver figura 19).



**Figura 19.** Los elementos que se encuentran dentro de la zona de visión tienen mayor importancia.

La **fuerza social total** es la suma de todas las fuerzas: la fuerza de velocidad deseada, la fuerza de repulsión de obstáculos y la fuerza de interacción. Por lo tanto, para cada peatón la nueva velocidad estará dada por la fuerza social total (ver figura 20).

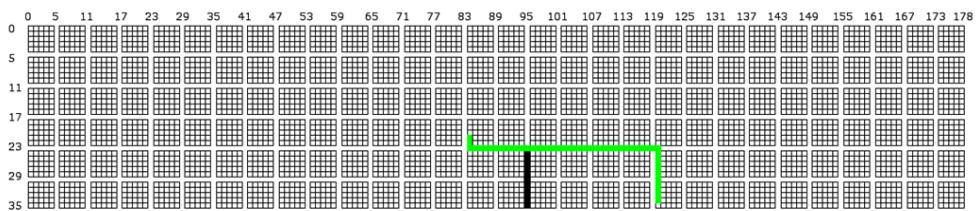


**Figura 20.** La velocidad estará dada por la fuerza social total que es el resultado de la combinación de todas las fuerzas.

## Anexo 3. Cálculo de las rutas más cortas

Una vez que el vagón este dividido en sub-celdas se procederá a calcular las rutas más cortas entre todas las sub-celdas. Las rutas más cortas serán asignadas a cada peatón como la velocidad deseada que tendrán dentro del vagón. La aplicación de las rutas más cortas por parte de los peatones les permitirá moverse de manera más “inteligente” y similar a como sucede en la realidad. Las rutas más cortas se calcularán fuera de línea y serán almacenadas en una base de conocimientos dentro de un archivo XML denominado shortestPhats.xml. Por lo tanto, la simulación del comportamiento de los peatones dentro del vagón se ejecutará de manera más eficiente porque únicamente las rutas más cortas tendrán que cargarse en memoria sin necesidad de calcularlas en ese instante.

Por ejemplo, considerando la distancia de Manhattan, es decir, no se permiten caminos diagonales en las rutas. El polígono que representa la ruta más cortas entre las sub-celdas (120, 34) y (84, 21) se muestra en la figura 21.



**Figura 21. La ruta más cortas entre las celdas (120, 34) y (84, 21).**

## Algoritmo A\*

El algoritmo que es utilizado para calcular la ruta más cortas es el algoritmo A\*. El algoritmo consiste primeramente en dividir el espacio en celdas. Cada celda estará relacionada con sus celdas adyacentes y con su celda “padre”. La celda padre será aquella por la cual el algoritmo ha llegado a tener en cuenta la celda actual como posible candidata a formar parte de la ruta más corta final.

Los costes de las celdas en el mapa utilizado por el algoritmo A\* pueden representar distintos tipo terrenos y su dificultad para transitarlos. Por lo que dentro de los vagones se pueden aplicar costos para evaluar las rutas más cortas. Por ejemplo, asignar un costo infranqueable donde se encuentre una barra metálica, o un coste medio a asientos (aunque no se puede pasar, los pasajeros si se pueden sentar) o asignar menor costo de movilidad en los pasillos.

Por ejemplo, supongamos los siguientes tipos de costos en el vagón en términos de porcentaje:

- Asiento (gris) : Movimiento al 50%
- Barras o lugares donde no se puede pasar (negro): Movimiento al 0%
- Pasillo (gris claro): Movimiento al 75% de la velocidad normal (es más difícil pasar cerca de los asientos).
- Pasillos y vestíbulos (blanco): Movimiento al 100%, no hay dificultad para moverse.

Un posible escenario se muestra en la Figura 22, las sub-celdas coloreadas en rojo sirven para ubicar los centros de las celdas en alta resolución, y las sub-celdas pintadas de verde indican la ruta más corta calculada por A\* entre esas sub-celdas.

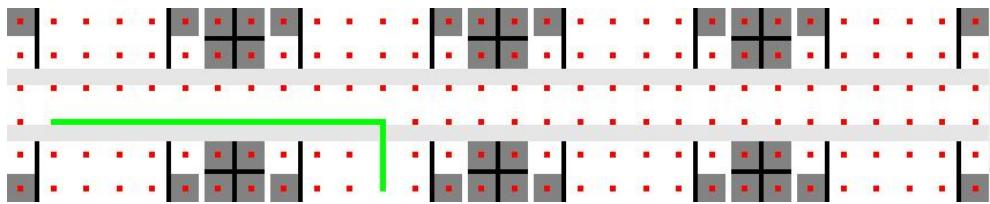


Figura 22. Escenario estándar del SSTCM



