TESIS DE GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

SOBRE LA MARCHA

ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA DEL SERVICIO DEL TRANSPORTE PÚBLICO AUTOMOTOR URBANO

Autor: María Agustina González

Legajo: 46.080

Director de Tesis:

Ing. Sebastián Mur

Año 2010

RESUMEN

Seguramente a cualquiera que haya tenido que tomarse un colectivo en la Ciudad de Buenos Aires alguna vez le sucedió que tuvo que esperar más de lo normal en la parada. Mientras se preocupaba por llegar tarde al trabajo, la facultad o la cita con el médico divisó al tan esperado colectivo a lo lejos y en ese primer instante se alegró. Pero esa pizca de alegría fue desplazada por enojo o bronca al siguiente instante cuando notó que otro colectivo de la misma línea se acercaba justo detrás del primero.

La mayoría de la gente que pasó por esta situación una o más veces le atribuye la culpa a los conductores, sin saber que fue afectada por un fenómeno conocido en la jerga del transporte público como “apelotonamiento”, cuyos culpables son muchos otros factores además de los conductores, que en realidad son los que menos efecto tienen sobre el apelotonamiento.

De esos culpables se hablará más adelante, lo que vale la pena notar es que gran parte de la población sufre este fenómeno todos los días – sus tiempos de espera se alargan – y aunque parezca difícil de creer las empresas que ofrecen estos servicios también lo sufren. El tiempo de viaje para cumplir el recorrido se acrecienta y por la insatisfacción de muchos clientes, los pierden. Los pierden frente al subte, frente a los automóviles particulares, frente a cualquier otra alternativa que haya; pero si los clientes pueden costearlo elijen la segunda.

Como se puede ver, esta es una de las razones por las cuales moverse en la ciudad es cada día más complicado, congestionamiento es la palabra más escuchada. Por lo tanto no sólo sufren el fenómeno los usuarios del colectivo, sino también todo aquel que deba transportarse de un lugar a otro en la ciudad.

En este trabajo se estudiará cómo se puede controlar el fenómeno de apelotonamiento de vehículos para que el transporte público sea más atractivo, se sustituyan los automóviles particulares por éste y se descongestionen en cierta medida las calles de la Ciudad de Buenos Aires.

DESCRIPTOR BIBLIOGRÁFICO

El presente trabajo se centra en el problema de inestabilidad de la frecuencia de las líneas de colectivo urbanas, particularmente en la evaluación de estrategias de control para su disminución. Se revisa y analiza el estado de la cuestión, pasando por los distintos tipos de estrategias existentes y su evolución. Se genera un modelo de simulación para la comparación de algunas de ellas, y nuevas variantes también, en un ambiente controlado y se evalúa la performance de cada una bajo distintas condiciones. Se logra solucionar un problema general en el ambiente del transporte público, pudiéndose hacer recomendaciones para cada caso en particular.

Palabras clave: transporte público urbano, colectivos, inestabilidad de la frecuencia, apelotonamiento de vehículos, estrategias de control, *holding*, simulación.

ABSTRACT

This paper is focused on the equal headway instability phenomenon for bus lines, particularly on the evaluation of control strategies for its reduction. To begin with, the state of the issue is checked and analyzed, by considering the different types of control strategies nowadays and their evolution. In order to compare and contrast some of them in a controlled environment, a simulation model is created. This model allows us to evaluate strategies performances under varying conditions. We manage to solve a general issue in public transportation, and gain the capability to make recommendations for each specific scenario.

Keywords: public transport, bus lines, equal headway instability, aggregation of vehicles, platooning, control strategies, holding, simulation.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar estas líneas para agradecer por su apoyo y colaboración a las siguientes personas:

- A mi tutor, Sebastián Mur, por aventurarse en esta tarea conmigo y brindarme su tiempo y dedicación.
- A mi familia y seres más queridos, por estar siempre y quererme tal cual soy.
- A mis amigos y compañeros, por caminar este tramo de la vida a mi lado. Aprendí muchísimo con ustedes y más de ustedes.

TABLA DE CONTENIDOS

< I > Introducción 1

I.1 ♦ Una introducción al problema de los sistemas de transporte 1

I.2 ♦ Relevancia del Problema 18

I.3 ♦ Motivación para Abordar el Problema 21

I.4 ♦ Etapas del Proyecto 22

I.5 ♦ Criterios de Éxito del Proyecto 23

< II > Estado de la Tecnología 24

II.1 ♦ Introducción a las estrategias de control durante las operaciones . 25

II.2 ♦ Evolución del Enfoque Conceptual Empleado para Resolver el Problema de inestabilidad de la frecuencia de servicios 29

< III > Definición del Problema 44

III.1 ♦ Conceptos Básicos y Terminología 44

III.2 ♦ El Problema 46

III.3 ♦ cuantificación del problema 48

< IV > Solución Propuesta 58

IV.1 ♦ Una Solución Integradora 58

IV.2 ♦ Desarrollo del Modelo de Simulación 59

IV.3 ♦ Desarrollo de ESTRATEGIAS de CONTROL 72

IV.4 ♦ Desarrollo de la Interfase y animación 78

< V > Resultados Obtenidos 81

V.1 ♦ LOS TIPOS DE LÍNEAS 81

V.2 ♦ RESULTADOS POR LÍNEA 82

V.3 ♦ RESULTADOS POR TIPO DE ESTRATEGIA 88

< VI > Conclusiones y Futuras 97

Líneas de Investigación 97

VI.1 ♦ CONCLUSIONES 97

VI.2 ♦ FUTURO 102

< VII > Bibliografía 104

VII.1 ♦ Bibliografía General 104

VII.2 ♦ Documentos Técnicos Específicos 104
VII.3 ♦ Otras Fuentes de Información 105
< VIII > Anexos 106
VIII.1 ♦ BRT 106
VIII.2 ♦ Trenes ligeros y carriles de colectivos 107
VIII.3 ♦ Estrategias adaptativas 108
VIII.4 ♦ Resultados por línea completos 109

< I > INTRODUCCIÓN

I.1 ♦ UNA INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE

La historia de Julio Verne proporciona una buena impresión de la alta eficiencia que los sistemas de transporte habían alcanzado en 1872. "El mundo se ha vuelto más pequeño, ya que un hombre puede ahora dar la vuelta diez veces más rápido que hace cien años.", escribe Verne. Ahora, 138 años más tarde, podríamos hacer su viaje otras cuarenta veces más rápido. ¿Qué diría él al respecto?

El mundo ha experimentado más de doscientos años de avances sin precedentes en la tecnología de los vehículos, el desarrollo de sistemas de transporte, y la extensión de la red de tráfico. El progreso tecnológico continúa, pero parece haber alcanzado ciertos límites. La congestión, la contaminación, y los costos crecientes han creado, en algunas partes del mundo, un clima de hostilidad en contra de la tecnología del transporte. La movilidad, sin embargo, sigue aumentando. ¿Qué puede hacerse?

Los sistemas de transporte de hoy son el resultado de sólo 200 años de desarrollo, que se rigen por dos fuerzas principales, a saber, los avances en tecnología de los vehículos ("más rápido") y las extensiones de la red de tráfico ("más").

El punto de partida para el desarrollo de las tecnologías modernas es la invención de la máquina de vapor de Watt en 1769. Sólo dos décadas más tarde, las primeras locomotoras y barcos impulsados por vapor permitieron el transporte de pasajeros y mercancías en una cantidad y velocidad hasta ese momento desconocidas. La construcción del automóvil por Benz y otros en los años 1880 y su producción masiva por parte de Ford en 1913, el tren eléctrico de Siemens & Halske en 1879, y el primer vuelo con un avión más pesado que el aire por los hermanos Wright en 1903 marcan algunos hitos en un proceso dinámico que continúa hasta hoy y que superó ampliamente incluso las extrapolaciones más salvajes de Julio Verne.

Cada tipo de vehículo requiere de una red adecuada. Varias de las redes troncales de tal fecha, también se remontan a los tiempos de Julio Verne. Nombres melodiosos de los primeros ferrocarriles intercontinentales como el "Orient Express" de París a Estambul, la "Golden Flyer" de Londres a París, o la famosa "Union Pacific" y el "Pacífico Occidental" de EE.UU. muestran que estas líneas estaban claramente concebidas como el inicio de las redes de transporte global de hoy. Un punto culminante de estos acontecimientos fue

alcanzado en la década de los años sesenta, cuando la movilidad, en particular, por los automóviles, se equiparó con la libertad.

Pero poco a poco surgieron los problemas: el tránsito comenzó a sufrir de la congestión, los residentes se quejaron del ruido, la contaminación y otros problemas ambientales. Actualmente los ferrocarriles y otros medios de transporte público se perciben como incómodos y tediosos de usar, mientras que los costos de operación explotaron. Para resolver esta crisis, la primera reacción fue la de aplicar las recetas de éxito del pasado. Los coches y los trenes más rápidos, la reducción de emisiones, y otras medidas técnicas, junto con las extensiones de la red, ayudaron. Sin embargo, saltó a la luz que los beneficios del progreso tecnológico y de inversiones adicionales en las redes de tráfico son limitados.

De hecho, si prestamos atención podemos llegar a descubrir que muchas de las soluciones que se aplicaron en el pasado generaron reacciones contra intuitivas, al corto o al largo plazo. Jay Forrester[1], en su estudio sobre Urban Dynamics, explica que este tipo de comportamiento se da con mucha frecuencia en sistemas complejos, en donde los componentes están interrelacionados de manera no lineal. Es por esto que las acciones correctivas para estos sistemas que pueden surgir de la lógica e intuición frecuentemente resultan inefectivas y hasta pueden llegar a ser contraproducentes. Un sistema complejo - una clase a la que una corporación, una ciudad, una economía, o un gobierno pertenecen - se comporta en muchos aspectos, de manera contraria a los sistemas simples con los que hemos adquirido nuestra experiencia.

El sistema de transporte es sin duda alguna un sistema complejo, del cual ya fueron mencionadas algunas de sus principales variables y más adelante se irán resaltando varias interrelaciones. Y en los sistemas complejos causa y consecuencia no están estrechamente relacionadas en tiempo y espacio. De hecho las causas se suelen encontrar, no en hechos pasados, sino en la estructura y en las políticas del sistema. Para complicar aún más las cosas, por lo general lo que puede llegar a parecer una causa en un sistema tal resulta ser solo un síntoma. Como resultado tratamos síntomas, no causas, por eso muchas veces el remedio es peor que la enfermedad.

En su estudio World Dynamics, Jay Forrester describe cuatro maneras en las que un sistema puede confundirnos.

“En primer lugar, un intento de aliviar un conjunto de síntomas sólo puede crear un nuevo modo de comportamiento del sistema que también tiene

[1] URBAN DYNAMICS, Jay Forrester; 1969, ISBN 1-56327-058-7. Productivity Press, PO Box 13390, Portland.

consecuencias desagradables. En segundo lugar, el intento de producir mejoría a corto plazo a menudo establece el escenario para una degradación a largo plazo. En tercer lugar, los objetivos locales de una parte de un sistema a menudo en conflicto con los objetivos del sistema mayor. En cuarto lugar, las personas son a menudo obligadas a intervenir en los puntos en un sistema donde existe poca influencia y donde el esfuerzo y el dinero tienen, pero ligero efecto."

De hecho si nos fijamos en nuestro objeto de estudio, el sistema de transporte, ya hemos caído en cada una de estas situaciones. A la primera oración se podría aplicar el hecho de que cuando parecía que la red ferroviaria existente no alcanzaba, esta era extendida. A partir de su extensión nuevos pueblos y centros urbanos nacían ya que la zona alimentada por la red se tornaba más atractiva. Sin embargo, como consecuencia del gran traslado de gente hacia esas nuevas zonas, estas se saturaban, tornándose insuficiente el sistema de transporte otra vez. La misma situación se da hoy en día cuando se ensanchan las autopistas. La segunda oración apunta a un arquetipo de la Dinámica de Sistemas muy conocido[2], que en nuestro sistema de estudio y más precisamente en nuestra ciudad se puede ver reflejado en los aumentos de las frecuencias de trenes por parte de las empresas, como medida para mejorar el servicio ofrecido. Pero sin un adecuado mantenimiento de las vías, el aumento mencionado puede llegar a deteriorarlas más, reduciendo así la velocidad de transporte de los trenes y empeorando el servicio a la larga. En estos casos lo más grave es que por aplicar la solución incorrecta se dificulta cada vez más la recuperación del sistema. La tercera situación descripta por Forrester se da cada vez que un ciudadano decide ir al trabajo en su auto particular para "llegar más rápido". La *Figura I.1* muestra cómo ésta solución termina generando un ciclo vicioso en el sistema de transporte. Por último pasaremos a la cuarta mención del autor. ¿Cuántas veces escuchamos hablar sobre nuevos combustibles, menos contaminantes? Seguramente su efecto no será contraproducente, pero ¿qué tanto pueden llegar a ayudar dada la situación en la que nos encontramos?

[2] Peter Senge define en **La quinta disciplina** ocho arquetipos de la dinámica de sistemas. En este caso el que se aplica es el llamado *Fixes that fail*, es decir la solución contraproducente.

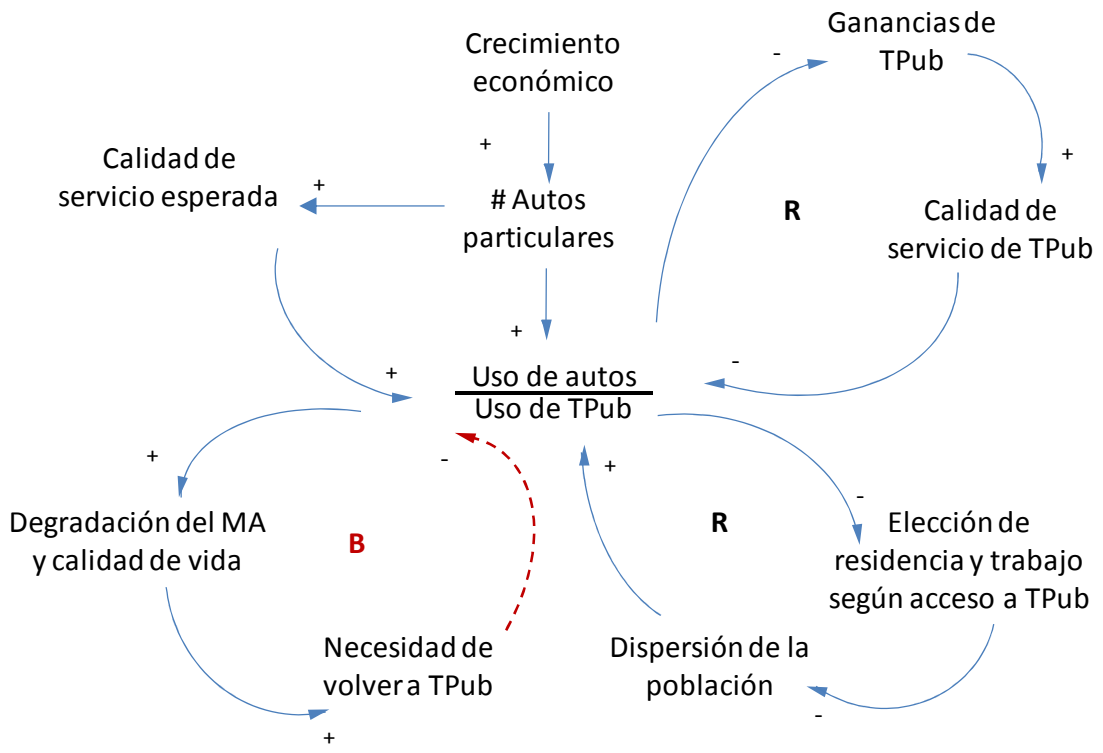

Figura I.1 – Diagrama causal del sistema de transporte

Ya habiendo mencionado algunas respuestas contra intuitivas del sistema de transporte, se muestran en la *Figura I.1* varias relaciones entre algunas variables claves del sistema. De dicha figura se desprende que un crecimiento económico permite a la población comprar autos particulares, y a mayor cantidad de autos, mayor es la calidad de servicio esperada ya que la comodidad que estos ofrecen no se compara en general con la del transporte público. Esto lleva a que haya una sustitución del transporte público (TPub) a los autos y relacionada a dicha sustitución se pueden hallar a primera vista dos ciclos que refuerzan éste fenómeno. En el primero, por la sustitución mencionada los ingresos del transporte público se reducen, con lo cual se reduce la calidad de servicio ofrecida y vuelve a aumentar el uso de automóviles. En el segundo, la elección de residencia y trabajo deja de ser acorde al acceso al transporte público que se puede llegar a tener, esto deviene a largo plazo en una mayor dispersión de la población y, por consiguiente, en un mayor uso de los automóviles. En el diagrama se divisa un último ciclo o *loop* balanceador, es decir, que tiende a balancear el sistema. Este consiste en un incremento en la degradación del medio ambiente y un deterioro de la calidad de vida por el aumento de la utilización de autos particulares, que lleva a su vez a una mayor necesidad de realizar una sustitución en dirección inversa a la actual, o sea, de autos por transporte

público. De esta manera se podría recuperar la calidad de vida y encontrar un equilibrio sustentable en el sistema. El tema es cómo impulsar esa sustitución inversa.

Si la movilidad y, por tanto, la demanda de transporte siguen aumentando, ¿qué más se puede hacer? ¿Cambiar "las reglas del mercado" por la legislación para imponer restricciones artificiales o aumentar los costos en la movilidad? Tal vez esto puede ayudar también, o no. Pero cualquiera que sea la medida, una acción es cierta: tenemos que hacer un mejor uso de nuestros recursos, es decir, **debemos optimizar nuestros sistemas de transporte**. Una forma de hacerlo es mejorar el diseño y el funcionamiento de los sistemas de transporte mediante una mejor planificación. Y parece que existen grandes potenciales no utilizados para la optimización, porque las normas de planificación en el sector de transporte son a menudo bastante bajas.

Como al igual que en las principales capitales del Mundo, la Ciudad Autónoma de Buenos Aires no es ajena a la importancia de tener un sistema de transporte público eficiente y accesible que permita un nivel de conectividad óptimo para sus usuarios. La eficiencia de un transporte público, al igual que su competitividad, hace a la eficiencia de un país o una ciudad en general y afecta directamente a la calidad de vida de su población. En nuestra ciudad se da un caso similar al de la mayoría de los centros cosmopolitas de países en vías de desarrollo, en los cuales en las últimas décadas los autos particulares han desplazado al transporte público, convirtiéndolo en la peor opción como mostraba la *Figura I.1*.

Pero tal crecimiento en la demanda de vehículos particulares ha llevado a estas ciudades al colapso total. En las horas pico el tiempo de viaje se puede llegar a triplicar, sobre todo si se viaja desde las afueras de tales ciudades. A su vez, este crecimiento también conllevó a mayores niveles de contaminación sonora y del aire, deteriorando la calidad de vida de los ciudadanos.

Como se puede ver, estas consecuencias las sufrimos todos. Pero hay una solución para cada una de estas ciudades, incluida la Ciudad de Buenos Aires, que no implica una gran inversión en tecnología. Si logramos que la gente sustituya al automóvil particular por el transporte público se verán reducidas la congestión en las calles, pudiéndose viajar más rápido a su vez en los colectivos (transporte público automotor urbano - TPAU), y la contaminación ya mencionada.

En comparación con los sistemas de transporte urbano dominados por los vehículos privados, sistemas dominados por los colectivos resultan en una menor congestión por tráfico, un menor consumo energético y menores emisiones, y una mejor movilidad para todas las clases sociales y económicas. El ahorro de combustible, las reducciones de CO2 del aire y la reducción de contaminantes por cambiar a los viajes en vehículo pueden ser grandes - posiblemente mucho más grandes que las de hacer un cambio de combustible o actualizar la tecnología para el vehículo. Este no es un tema menor, si se observan las proyecciones de crecimiento en el uso de combustibles para el transporte de la IEA – International Energy Agency – no hay duda de que la situación es alarmante, sobre todo para los países en vías de desarrollo (Ver *Figura I.2*).

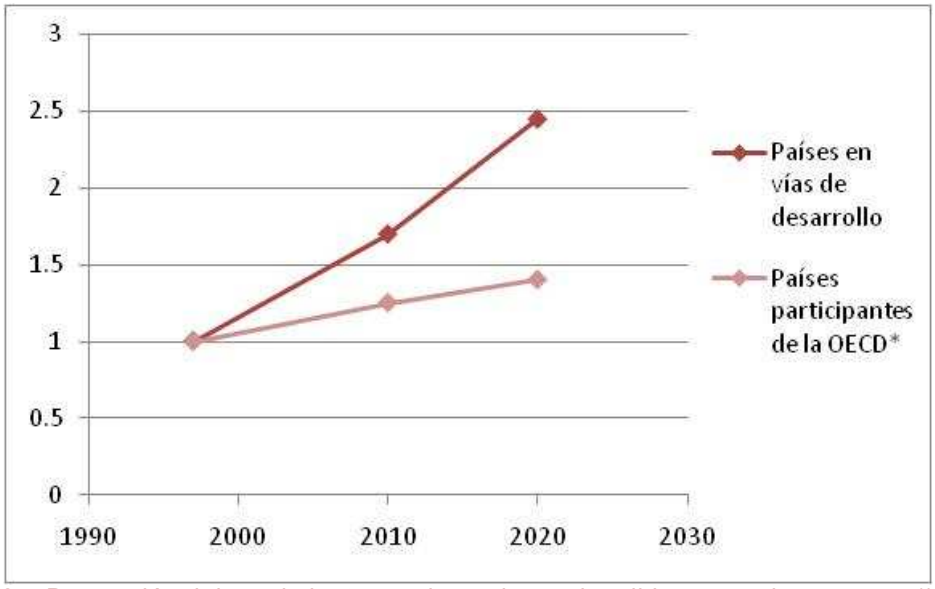

Figura I.2 – Proyección del crecimiento en el uso de combustibles para el transporte (*Algunos países que conforman la OECD – Organization for Economic Co-operation and Development – son Austria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, entre otros.)

Además, visto ahora desde el lado de la empresa de transporte, si mejoramos la calidad del servicio se puede justificar un aumento en las tarifas, en el caso en que éstas no estén totalmente reguladas por el estado.

Ahora bien, para recuperar antiguos clientes del TPAU hay que mejorar el servicio ofrecido por este. Éste es el objetivo principal de la Tesis, **evaluar distintas estrategias destinadas a mejorar el servicio del transporte público en la Ciudad de Buenos Aires para que la sustitución inversa se pueda llevar a cabo.**

En este caso se buscará, más específicamente, poder garantizar una **frecuencia constante de servicios**, la cual según ha sido estudiada por otros autores y ha arrojado menores tiempos de espera en paradas para los pasajeros así como también mejor aprovechamiento de la capacidad de los

vehículos. Como se puede ver, se está apuntando a mejorar la calidad del servicio del transporte público mediante una optimización de los recursos, sin requerir una gran inversión tecnológica ni monetaria.

I.1.a – El problema a tratar específicamente en esta tesis

Como ya se mencionó, el problema objeto de estudio es la **inestabilidad de la frecuencia de los servicios**[3] que se da en cualquier medio de transporte público, y en particular se ve agravado en el TPAU, es decir, los colectivos de la Ciudad de Buenos Aires.

Entre las causas principales que dificultan el mantenimiento de una frecuencia deseada de servicios podemos encontrar algunas causas exógenas y otras tantas endógenas. Dentro de las exógenas, externas al sistema bajo control, se ven:

- **la propia distribución de llegadas de pasajeros a las paradas**: la cual se puede asumir que sigue una distribución Poisson con una media λ de tiempo entre arribos si los tramos entre paradas son cortos (menores a 10 minutos)
- **las demoras por semáforos**: que pueden afectar de manera distinta a vehículos consecutivos
- **el tránsito**: el cual varía la velocidad media según la zona y el horario
- **los obstáculos**: interferencia con vehículos estacionados en la calle a la altura de las paradas
- **las causas especiales**: que son eventos que la mayoría de las veces no pueden ser previstos, exceden el curso normal del sistema y lo interrumpen, como por ejemplo cortes de calles por accidentes o manifestaciones

Dentro de las endógenas, las que podemos llegar a controlar, están:

- **la conducta del conductor del vehículo**
- **la configuración de la ruta**
- **la programación inadecuada de los itinerarios**

La situación que se da es la siguiente, si se retrasa un vehículo, entonces habrá un menor tiempo entre arribos con el vehículo posterior y un

[3] Con frecuencia se hablará en el trabajo de inestabilidad o variabilidad de las "frecuencias" entre servicios, cuando técnicamente se estará haciendo referencia (y el modelo mide) a los tiempos entre llegadas sucesivas de los coches que en realidad son los períodos entre servicios (período = 1/frecuencia). Se optó por usar la palabra frecuencia en vez de período por ser más común y menos técnica, sabiendo que a los efectos del problema se podrían tomar un o la otra sin verse afectado el análisis.

mayor tiempo entre arribos o distancia con el vehículo delante de él. Mayores distancias van a resultar en más pasajeros esperando en las estaciones, que llevan a más retrasos para el vehículo ya atrasado. Además, una menor distancia con respecto al vehículo de atrás va a conducir a menos de pasajeros en espera para éste. Así, los vehículos que se mueven detrás de un vehículo retrasado irán más rápido que el promedio. Después de algún tiempo, varios vehículos se apelotonan, es decir, que viajan juntos. Esto hace que el servicio sea ineficiente, ya que la gente debe esperar más tiempo para que un pelotón llegue del que esperaría si los vehículos estuvieran igualmente espaciados en el tiempo. Además, cuando un pelotón llega a la estación, hay mucha más gente esperando, y se retrasa el flujo de pelotón. La *Figura I.3* ilustra este fenómeno.

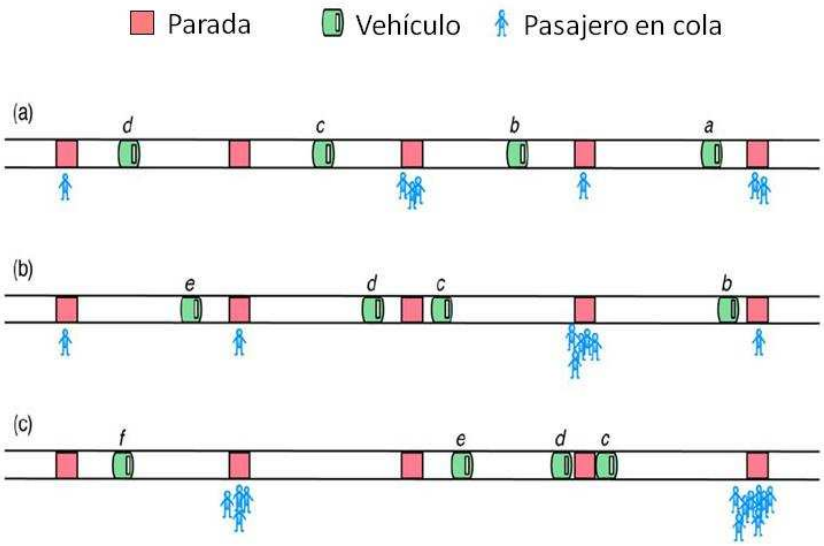

Figura I.3 – Inestabilidad de la frecuencia de servicios

Por último, las ocupaciones de los vehículos en estas circunstancias varían ampliamente. Lo que ocurre es que el colectivo al frente del pelotón suele viajar con un exceso de pasajeros mientras que los que lo siguen pegados atrás circulan prácticamente vacíos. Otra consecuencia indeseable de este fenómeno es que, salvo que los vehículos tengan permitido sobrepasarse, el tiempo de una vuelta se ve incrementado debido a que todos los vehículos quedan atrapados detrás del que va al frente que tiene grandes tiempos de demora en paradas por subida y bajada de gran cantidad de pasajeros.

De este modo, no solo se ven perjudicados los pasajeros por sufrir mayores tiempos de espera en paradas y viajar en peores condiciones por la variabilidad de ocupación de los vehículos generada por la inestabilidad de los tiempos entre arribos de los colectivos, sino también las empresas proveedoras del servicio de transporte porque los tiempos de las vueltas son mayores y

algunos pasajeros pueden cambiar de medio ante largas esperas, lo que resulta en una menor recaudación.

I.1.b - Breve reseña de la historia y actualidad del transporte público argentino

Ya que este trabajo estará enfocado a cambios que se pueden implementar en el transporte público argentino e incluirá una etapa de aplicación específicamente a una línea de colectivos de la Ciudad de Buenos Aires, no se puede dejar de hacer un relato de los hitos en la historia del transporte público argentino y del contexto en el que se desarrollarán las propuestas que surjan de esta tesis. Estos se presentan a continuación y se pueden ver resumidos en la línea de tiempo de la *Figura I.4*.

- **1857**: se inauguró el primer ferrocarril (del Oeste, cubría entre plaza Lavalle y Floresta) del país con el propósito de enlazar los centros de producción ganadera y minera con el puerto desde donde se exportaba la materia prima a Europa y Estados Unidos. El desarrollo de las redes ferroviarias en América Latina se realizaron a través de concesiones que otorgaban los gobiernos en especial a empresarios británicos y estadounidenses. Le siguieron el ferrocarril del Norte (1863), Sud (1865), Central.
- **1863**: se inauguró la primera línea de tranvías de Buenos Aires y de la Argentina. Se instaló como complemento del Ferrocarril del Norte, transportaba a los pasajeros desde Retiro (la estación) al centro de la ciudad (Plaza de Mayo). A ésta le siguió la que instaló el Ferrocarril del Sud con iguales intenciones, desde su estación de la Plaza Constitución a lo largo de la calle Lima. Pero ambas estaban al servicio de los viajeros del tren.
- **1870**: Las primeras líneas de tranvías urbanas propiamente dichas se inauguraron. El "Tramway Central" y el "Tramway 11 de Setiembre".
- **1870-1914**: se construyó la mayor parte de la red ferroviaria argentina con capital inglés, francés y argentino. Esta red llegó a ocupar el décimo puesto en el mundo, con cerca de 47.000 kilómetros hacia fines de la Segunda Guerra Mundial. El ferrocarril fue palanca del desarrollo y poblamiento del territorio del país.
- **1880**: comienzan a perfilarse las futuras grandes compañías de tranvías: el “Tramway Anglo Argentino” y la “Cía. Ciudad de Bs. As”. adquiriendo y anexándose otras menores. Pero también en esta década surgen nuevas empresas como "La Gran Nacional", "La Capital", "La Nueva" y "El Metropolitano", con lo cual Buenos

Aires se puso a la cabeza de las ciudades del mundo en lo que a transporte tranviario se refiere; puesto que si comparamos el kilometraje de vías con relación al número de habitantes, no había otra que pudiera superarla.

- **1892**: se ensaya el **primer** tranvía eléctrico de la Argentina, pero no en Buenos Aires, sino en ciudad de La Plata.
- **1897**: se instalaron 2 líneas eléctricas de tranvías en Bs. As.
- **1908-1909**: se produce la denominada "Fusión de los Tranvías". Quedan circulando cuatro empresas.
- **1913**: la ciudad cuenta con su primera línea de **tranvías subterráneos, línea A.** (primera en Buenos Aires, en América Latina, en todo el hemisferio sur y hasta en todo el mundo de habla hispana).
- 1915: Aparece la industria local de tranvías. El Anglo carroza tranvías y a partir de 1922 fabrica sus primeros coches con diseño propio. Época del máximo apogeo. **875 Km de vías,** más de **3.000 vehículos** y **12.000 empleados** para circular por **99** recorridos y llegar a transportar **650.000.000 de viajeros** anuales.
- **1922**: circulan las primeras empresas de ómnibus.
- **1928**: los taxistas que por entonces sufrían un período de escasez de pasajeros, decidieron unirse en pequeños grupos y hacer viajes con recorrido fijo, generalmente siguiendo el de una línea de tranvías, llevando su mismo número y hasta circulando delante de sus coches para "robarles" pasajeros. A este sistema dio en llamársele "colectivo" (resumen de auto-colectivo).
- **1930**: se inauguró la segunda línea subterránea.
- **1933**: se inauguró la tercera línea subterránea.
- **1930**-**1935**: la competencia entre tranvías y colectivos se hace realmente feroz.
- **1939**: creación de la "Corporación de Transportes de la Ciudad de Buenos Aires" (C.T.C.B.A.). Ésta, de capital mixto (privado y municipal), incorporaba Tranvías, ómnibus, colectivos y a partir de junio de 1948 un nuevo integrante del elenco, el trolebús.
- **1946**: se produce el proceso de nacionalización del sistema ferroviario argentino. Las diversas partes del sistema (unas 15 empresas ferroviarias por ese entonces) fueron reagrupadas en 6 líneas, cada una de las cuales proveía servicios de carga, de pasajeros interurbanos y de pasajeros de la Región Metropolitana de Buenos Aires (líneas Mitre, Roca, San Martín, Urquiza, Sarmiento y Belgrano).
- **1948**: por el desmanejo interno y la falta de insumos por la Segunda Guerra Mundial la "Corporación" entró en liquidación.

- **1950**: la empresa fue estatizada, rebautizándosela como "Transportes de Buenos Aires"**.**
- **1958**: comienza un periodo que puede llamarse de 'regresión'. En efecto, políticas a favor del desarrollo de la red caminera (transporte por carretera) desarrollaron planes de clausura y levantamiento de vías.
- **1961**: se decide por decreto la eliminación de los tranvías (en el momento de su resurgimiento, quedaron tranvías sin ser estrenados).
- **1965**: se crea la Empresa Ferrocarriles del Estado Argentino (convertido luego en Ferrocarriles Argentinos -FA-) como consolidación de las líneas mencionadas.
- **1985-1990**: tras sucesivos cambios en la orientación empresaria, la situación de Ferrocarriles Argentinos era más difícil aún. Con una participación menor al 15% en los servicios de pasajeros de la Región Metropolitana de Buenos Aires y de sólo el 8% en el mercado del transporte de cargas y en el de pasajeros de larga distancia, sus necesidades de financiamiento para cubrir el déficit operativo y para financiar parte de las inversiones necesarias se ubicaba en el orden de los 600/700 millones de dólares anuales, monto que al tipo de cambio vigente en ese momento, se ubicaba, cerca del 1% del PBI. Las dificultades financieras se reflejaban en las condiciones del material rodante y las instalaciones: sólo una de cada dos locomotoras diesel eléctricas (sobre un total de 1.000) se encontraba en funcionamiento y el 55% de la longitud de vías se hallaba en estado regular o malo.
- **1989**: el gobierno nacional decidió encarar un proceso "masivo" de privatizaciones en el que, entre otras empresas públicas se incluyó a la empresa ferroviaria nacional, Ferrocarriles Argentinos. Los 35000 Km de vías fueron concesionados por partes, por períodos de entre 10 y 30 años, dependiendo del tipo de transporte (pasajeros o carga).

Con una simple mirada a estos eventos se puede notar que hubo una época de auge de inversiones en infraestructura y desarrollo de los medios de transporte públicos. Pero eso quedó atrás hace más de cincuenta años. Luego aparecieron las décadas de regresión, falta de inversión y mal manejo en el sistema, pasando de sistemas nacionalizados a privatizados y de privatizados a nacionalizados otra vez. Ya que se va a hacer un foco especial en este trabajo en el TPAU, es importante aclarar que actualmente dicho sistema es descentralizado y privado en la Ciudad de Buenos Aires. Se podría

analizar la conveniencia o no de este sistema frente a otros – centralizado y privado, o centralizado y estatal – pero se deja este análisis para futuros trabajos, ya que es preciso no desviarse del objetivo de estudio de este trabajo. Sí se tendrá en cuenta el hecho de que el sistema sea hoy en día descentralizado y privatizado a la hora de evaluar la implementación de distintas estrategias para mejorar la calidad de servicio. Además, este hecho permite explicar la situación en la que se encuentra actualmente el sistema de TPAU. Por lo general, las empresas proveedoras independientes sobreviven el día a día sin ser capaces de realizar grandes inversiones en bienes de uso (tecnología, colectivos, etc.). Pero eso no es todo, la mayor parte del problema se encuentra en la manera en que el sistema está regulado y es gestionado. Por deficiencias en estas áreas hay una competencia feroz entre las empresas, casi por cada pasajero, se relega el planeamiento estratégico además de la inversión y el servicio coordinado.

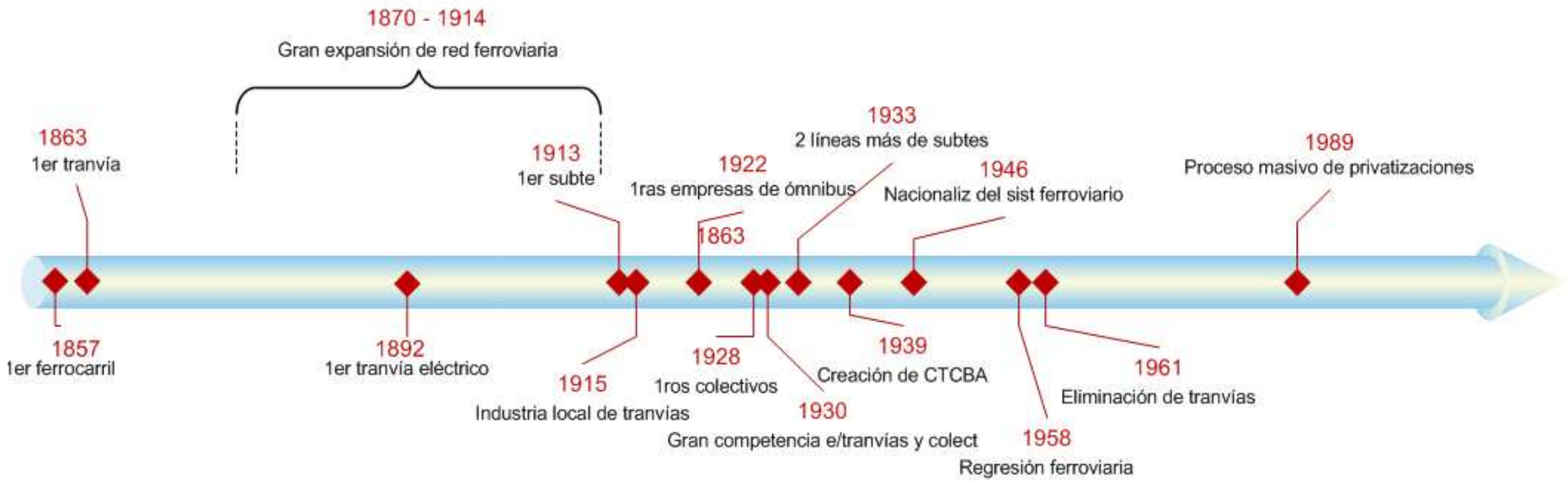

Figura I.4 – Historia del transporte público argentino

Por otro lado, cabe resaltar algunos de los últimos acontecimientos y medidas más importantes relacionadas con el transporte público de la Ciudad de Buenos Aires, para tener una mejor idea del entorno en el cual se desarrolla el proyecto. Algunos de los títulos[4] destacados en la materia a lo largo del último año fueron:

- *Priorizan la circulación del transporte público sobre Pueyrredón. Crearon vías preferenciales. 02/01/ 09*
- *Subieron las tarifas entre un 20 y 25% de subtes, colectivos y trenes. Se ahorraría el gobierno 800 MM en subsidios. 12/01/ 09*
- *Shell dejó de proveer de gasoil subsidiado al transporte publico.20/01/09.*
- *Los subsidios se duplicaron en 2008, hasta $ 30.908 millones. 14/02/09.*
- *El servicio público, costoso e ineficiente. 24/02/09*
- *Transporte público: es barato, pero no hace utilizar menos el auto. 10/06/09*
- *El furor de la tarjeta sube. 20/06/2009. El Sistema Único de Boleto Electrónico (S.U.B.E.) funciona en las líneas de subtes A,B,C,D,E y H, en los ferrocarriles Urquiza (estaciones Lacroze, Lynch, Lourdes, Tropezón, Bosch, Martín Coronado, Rubén Dario, Ejército de los Andes, Lemos) y Belgrano Norte (estaciones Retiro, Aristóbulo del Valle y Boulogne), y en las líneas de colectivos 5, 8, 20, 50, 61, 62 y 101.*
- *El tránsito es el mayor contaminante. 20/09/09*
- *Aprueban un préstamo para el transporte.21/10/09. Según el organismo, la demanda de transporte público en la Argentina se ha incrementado en los últimos años, como muestra el aumento en un 19 por ciento en el caso del subterráneo y del 17 por ciento en el caso de los trenes suburbanos. En este sentido, el sector del transporte urbano "necesita pasar a una nueva etapa en la que se desarrollen inversiones sustanciales en infraestructura para poder así satisfacer adecuadamente la creciente demanda".*
- *El primer colectivo ecológico. 10/11/09*

[4] Fuente: Diario la Nación.

Gracias a ellos podemos comprobar algo que ya ha sido mencionado en esta sección; hay una gran ineficiencia en el uso de los recursos y en el manejo de los sistemas de transporte de la ciudad. Avances tecnológicos tales como la implementación del boleto electrónico pueden ayudar pero son aportes secundarios. La gran mejora va a surgir de medidas que permitan un funcionamiento más eficiente del sistema, de mejoras en la operación y en la planificación. Afortunadamente podemos rescatar algunas noticias bajo este marco, como por ejemplo la instalación de carriles exclusivos para los colectivos. De todos modos hay muchas más cosas que se pueden hacer y que no requieren cambios tan grandes en la infraestructura urbana como el mencionado. Es la intención de esta tesis mostrar algunos de ellos y el impacto que pueden generar en nuestro sistema.

I.1.c - El colectivo como medio de transporte público

Como este trabajo hará énfasis en propuestas de mejora del servicio de los colectivos (TPAU) de la Ciudad de Buenos Aires, debido a que incluye una aplicación directa para una empresa del sector gracias a la cual se podrán obtener comparaciones y conclusiones de manera de lograr demostrar cuantitativamente las mejoras obtenidas a partir de lo propuesto, resulta importante destacar algunas características del TPAU en comparación con otros medios de transporte público.

Son muchas las variables que pueden entrar en juego a la hora de comparar los distintos medios de transporte. Si se clasifica a éstos según su mecanismo de traslado se pueden encontrar varias diferencias significativas. Como muestra la *Figura I.5* los sistemas de vías fijas cuentan con algunas ventajas muy importantes frente a los colectivos. En primer lugar, no sufren congestiones de tránsito ya que cuentan con su estructura separada de los caminos automotores y las barreras les dan prioridad en las uniones. En segundo lugar, tanto los trenes subterráneos como los que están sobre tierra y hasta los tranvías tienen mayor capacidad de los colectivos (Véase *Tabla I.1*), reduciéndose así el tiempo de demora en estaciones con respecto a los colectivos. A su vez, los de sistemas de vías fijas suelen superar al TPAU en cuanto a la apariencia exterior y el diseño de su interior, hay excepciones y los trenes de la línea Roca son una de ellas pero esta sección se refiere a cualidades generales. Por último, los pasajeros valoran mucho el confort del viaje de los sistemas sobre vías, su suave aceleración y frenado, y su bajo ruido.

Figura I.5 – Comparación entre medios de transporte público

Por otro lado, obviamente los colectivos aventajan en varios aspectos al resto de los medios de transporte. En primer lugar, en general permiten un mejor acceso a los destinos y orígenes de los viajes de los pasajeros por ser un transporte automotor que puede transitar bien por el seno de las ciudades, viéndose reducido el tiempo de viaje a pie desde las paradas o estaciones hasta el destino final. En segundo lugar, el costo del boleto para los pasajeros suele ser menor - otra vez, los valores argentinos pueden llegar a confundir. Esto se debe a las siguientes dos cuestiones que se desarrollarán. Dos factores que favorecen mucho a los colectivos frente a las estructuras de vías fijas son sus menores costos de operación y la significativa menor inversión necesaria para su establecimiento. No todas las ciudades pueden afrontar los altos niveles de inversión y subsidios requeridos para implementar y operar los sistemas de vías fijas (Ver grados de magnitud en *Tabla I.1*).

Característica	Tranvías y trenes	Subtes	BRT	Colectivos
Capacidad (Pax/veh)	110-250	140-280	80-160	50-70
Vehículos/unidad	1-4	1-10	1	1
Velocidad máxima (km/h)	60-80	70-100	60-70	60-70
Velocidad comercial (km/h)	15-35	25-55	15-28	5-15
Máxima frecuencia por parada (uniades/h)	40	20-40	70-210	30-80
Capacidad en paradas (Pax/h/dir)	6000-20000	10000-72000	11000-40000	3000-11000
Inversión requerida (MM €/km)	15-50	30-200	1-10	<<

Tabla I.1 – Comparación de medios de transporte público

En la *Tabla I.1* se puede ver otro tipo de transporte público no mencionado aún. BRT (*Bus Rapid Transport*) es una nueva y mejorada opción de TPAU. A diferencia del sistema de colectivos comunes los rápidos tienen mayor capacidad, carriles privados que aseguran un movimiento fluido y desafectado por el tránsito, estaciones parecidas a las de los trenes que

posibilitan una menor demora de los vehículos en ellas, y en muchas ocasiones prioridad en los semáforos. Esta nueva modalidad ha sido implementada con gran éxito en ciudades como Curitiba, Bogotá, Goiania, Quito, Ottawa y Brisbane. Como se puede ver en la *Tabla I.1*, el BRT requiere una inversión mucho menor a la de los tranvías y trenes y logra transportar más pasajeros por hora – dirección que éstos. El BRT también presenta muchas ventajas frente al colectivo estándar, no es objeto de esta tesis el análisis de la conveniencia de instalar un sistema de BRT en la Ciudad de Buenos Aires. De todos modos se muestran sus características principales en la sección *VIII.1* y se deja dicho estudio como futura línea de investigación.

Como ya se mencionó, no es objeto de estudio de esta tesis la determinación sobre en qué invertir para mejorar la movilidad en la Ciudad de Buenos Aires. En el trabajo se tomará provecho de la estructura ya existente y se buscará optimizar su uso. Pero no se quiere dejar de recalcar que si bien son altos los montos de inversión requeridos para desarrollar los distintos sistemas de transporte, como muestra la *Tabla I.1*, la peor decisión que se puede tomar es la de no hacer nada; que es la política que viene siguiendo el país en esta materia. En la *Figura I.6*[5] se nota que el costo total mayor de un ciclo de proyecto de 20 años - incluyendo infraestructura, mantenimiento, equipo y operaciones – corresponde a esta alternativa.

[5] Para mayor explicación de las alternativas que se presentan en la figura dirigirse al Anexo VIII.2.

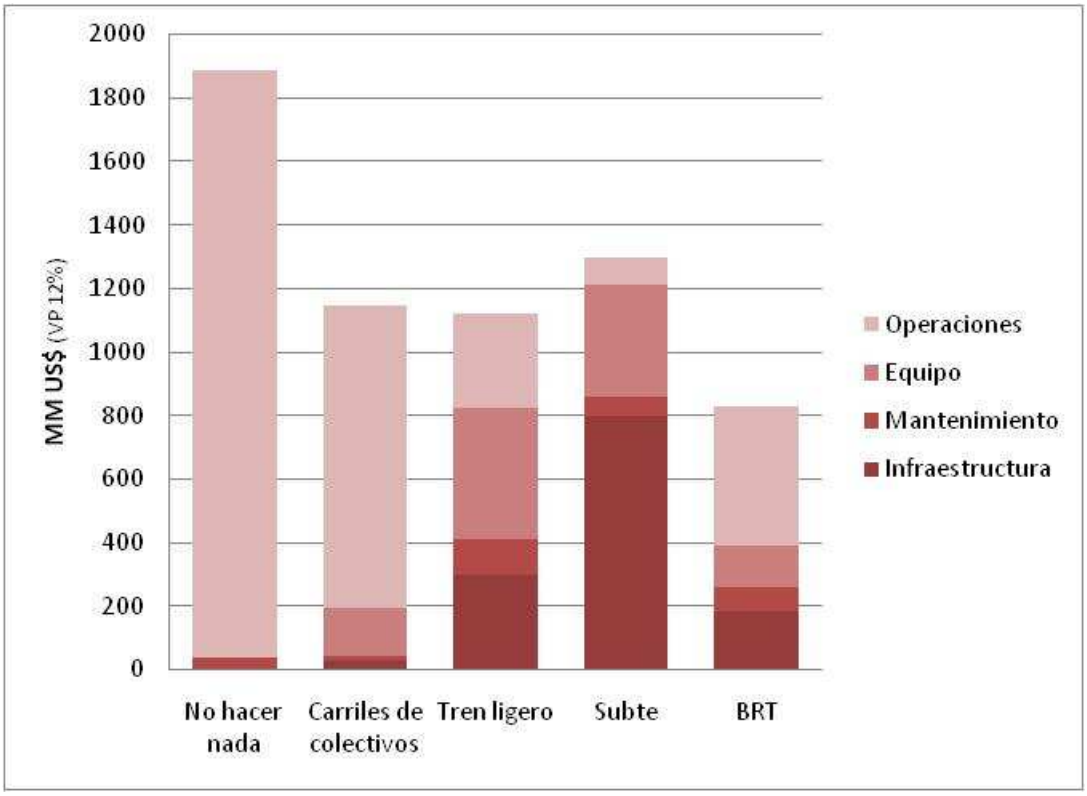

Figura I.6 – Costo total de un ciclo de proyecto de 20 años para un corredor de 20 km con 35000 pax/h/dir [6]

I.2 ♦ RELEVANCIA DEL PROBLEMA

Como se mencionó en la sección anterior, en este trabajo se evaluarán distintas estrategias en pos de garantizar una frecuencia constante entre servicios a las paradas. En esta sección se hará foco en la relevancia de este problema y hacia el final de la sección se mostrará cómo a partir de la solución de dicho problema se derivan soluciones para problemáticas más amplias que ya se han estado aludiendo.

Con respecto a la importancia de abordar este problema en particular cabe destacar que según estudios hechos 80% de la gente desea tiempos de viaje cortos, mientras que otros factores como seguridad, higiene y confort todos juntos solo representan el 12% de las respuestas[6]. Lo que nos lleva a analizar los elementos principales constitutivos del tiempo de viaje puerta a puerta de un servicio público de transporte. Entre ellos se encuentran los siguientes:

- velocidad media de los vehículos de transporte público

[6] Tom Reinhold, 2008. Journal of Public Transportation, Vol. 11, No. 3.

- **intervalos entre vehículos** (es decir, la cantidad de tiempo de espera para el vehículo inicial y todos los vehículos posteriores como consecuencia de transferencias)
- número y / o la necesidad de transferencias
- densidad de las estaciones o paradas (es decir, la distancia de la residencia y de destino más cercano a la estación o parada)

Un estudio muy detallado de estos elementos muestra que la mayoría de los encuestados coloca como máxima prioridad a los cortos intervalos entre vehículos. Es más, si se enfrenta a una elección entre el servicio que se ejecuta en intervalos muy cortos (10 minutos o menos) y una distancia mayor a la estación o parada (10 - a 15 minutos a pie) versus un servicio que se ejecuta en intervalos más largos (20 minutos) con una parada en las inmediaciones, la inmensa mayoría prefiere la caminata más larga. Las líneas con los más altos niveles de satisfacción del cliente son los que se ejecutan a intervalos tan cortos que los clientes ni siquiera necesitan mirar los horarios estipulados por la empresa. Esto nos da un primer punto a favor del problema que se tratará en la tesis versus el tan buscado cumplimiento del itinerario por otros autores.

Con respecto a esa disyuntiva, Strathman y Kimpel [9] establecen que es necesario distinguir entre líneas que tienen servicios de alta y baja frecuencia. En el caso de rutas con baja frecuencia el cumplimiento de los itinerarios debe ser el principal objetivo para la operación, según sus estudios. Esto se debe a que los pasajeros calculan sus arribos a las paradas en función a los itinerarios publicados por las empresas, contando con cierta probabilidad de perder el vehículo. En estas circunstancias, los tiempos de espera promedio son menores a la mitad del tiempo programado entre servicios. La adherencia al itinerario es también importante en estaciones de transferencia, por el riesgo involucrado de perder la conexión. Sin embargo, en el caso de líneas que operan con frecuencias de 10 minutos o menores, que son las que estaremos estudiando, el mantenimiento de la frecuencia constante se convierte en el objetivo primordial de operaciones. Esto está relacionado con el hecho de que los pasajeros no acomodan sus partidas en relación a los horarios de servicios programados y por lo tanto se puede asumir que sus llegadas a las paradas son aleatorias - siguiendo una distribución de Poisson.

Bajo estas circunstancias se ha comprobado que el tiempo de espera en paradas total se logra minimizar cuando los vehículos llegan igualmente espaciados en tiempo. Ya sólo con este logro se puede decir que conseguiremos aumentar considerablemente la satisfacción del cliente, porque éste valora tres veces más al tiempo esperando en la parada que al tiempo viajando en el vehículo (Mohring et al., 1987). De todos modos, los análisis no acabarán ahí, al evaluar las distintas estrategias de control de frecuencias se

tendrán en cuenta al mismo tiempo un conjunto de indicadores para asegurar no sólo la mayor satisfacción del cliente sino también una mayor rentabilidad para la empresa proveedora del servicio de transporte.

La relevancia de abordar este problema para la empresa proveedora no es menor. Ésta se ve reflejada principalmente en el hecho de que al tener los vehículos igualmente espaciados se logra una mejor distribución del parque automotor, necesitándose menos coches para el funcionamiento adecuando de la línea debido a que se logra reducir la variabilidad de la cantidad de pasajeros viajando por coche[10]. Así se aprovecha mejor la capacidad de los vehículos y no se producen grandes demoras en los colectivos que irían al frente del pelotón. Al mismo tiempo, el mantenimiento de tiempos entre arribos de servicios constantes no sólo reduce los tiempos de espera sino que significa mucho más para los pasajeros, para ellos mejora la calidad del servicio ya que les genera una mayor confianza hacia el sistema público. Esto hace que se pueda justificar un aumento en la tarifa, lo cual beneficiaría a las empresas proveedoras en caso de que éstas no estuviesen totalmente reguladas por el Estado. En el caso contrario, las empresas se verían beneficiadas de todas formas ya que una mayor confianza en el sistema atraería a más clientes. En el caso particular argentino, en que existe una intensa competencia en el sistema como se explicó en la sección anterior, esto podría significar ganar clientes de otras empresas, lo cual también genera mayores ingresos para la empresa en cuestión.

Por último, la relevancia del problema a tratar va más allá de lo recién explicado, según la IEA – International Energy Agency – mejoras a mediano plazo del sistema de colectivos en las principales ciudades de países en vías de desarrollo pueden ubicarse entre los más importantes y económicos intentos por alcanzar la sustentabilidad del transporte. En comparación a los sistemas de transporte urbano dominados por los automóviles privados, los sistemas dominados por TPAU resultan en menores congestiones de tránsito, menor uso de energía y emisiones y a su vez facilitan la movilidad de todas las clases sociales y económicas. Los ahorros en combustible, las reducciones de emisiones de CO2 y otros aires contaminantes que se generarían por la sustitución de los automóviles particulares por el colectivo pueden llegar a ser muy grandes, incluso mayores que aquellas que se pueden lograr a través de cambios en los combustibles o cambios tecnológicos en los propios colectivos. Para tener una idea de la magnitud de la que se está hablando, las emisiones de CO2 en una ciudad del tercer mundo dominada por TPAU podrían ser la mitad de las de una ciudad dominada por los autos privados.

Todo esto se ve reflejado en la gran cantidad de estudios que han sido llevados a cabo sobre el tema de estudio durante los últimos cuarenta años,

comenzando por Osuna y Newell en 1972. El problema sigue recobrando importancia año tras año debido a que por un lado el sistema se encuentra cada vez más saturado y por el otro, las tecnologías de sistemas de información que surgen permiten la creación e implementación de nuevas estrategias de control.

I.3 ♦ MOTIVACIÓN PARA ABORDAR EL PROBLEMA

Existen básicamente tres motivos fundamentales para abordar el problema descripto en el presente trabajo.

- En primer lugar, el interés personal en cuanto a la temática. Viajo todos los días desde el conurbano hacia el centro de la Ciudad de Buenos Aires y padezco como el resto las congestiones de tránsito tanto para ingresar a la ciudad como para trasladarse dentro de ella.
- En segundo lugar, el conocimiento de técnicas de simulación que permiten dar un enfoque distinto a un problema clásico.
- Y por último, la realización de un trabajo de asesoría a una empresa de TPAU enfocado en otro problema, la organización de su oficina de tráfico principalmente mediante la creación de un tablero de control, que permitió el contacto real con el problema de la inestabilidad de las frecuencias de los servicios y fue el disparador de una investigación referente al tema.

Las tres razones mencionadas, sumadas a la idea de que puede ser un trabajo fructífero a nivel académico, profesional y personal, constituyeron la base para encarar este proyecto.

Como Rueih-Shiarng Chiang y Shaw-Er Wang Chiang concluyen en su trabajo, el desarrollo socioeconómico de una sociedad depende del desarrollo del sistema de transporte de la región. Esta es la motivación última por la cual se encara este trabajo. Realmente sostengo la creencia de que los sistemas de colectivos pueden convertirse en un área de crecimiento para ciudades del tercer mundo como la Ciudad de Buenos Aires. Experiencias como las de Curitiva, Bogotá y Quito demuestran que lo que se plantea en el trabajo no es utópico y que los beneficios de lograrlo son substanciales. Como ya se mencionó, los sistemas de TPAU ofrecen la más económica y efectiva en términos de espacio y cuidado del medio ambiente solución para viajar dentro de una ciudad. Esto constituye la mayor motivación para estudiar, preservar, mejorar y expandir el sistema de TPAU.

I.4 ♦ ETAPAS DEL PROYECTO

El trabajo realizado puede esquematizarse como se aprecia en la *Figura I.7*. Éste consiste en 6 etapas secuenciales (que en la práctica se dieron con cierto solapamiento), que como se puede ver forman un ciclo de retroalimentación.

Puede observarse claramente como durante todo el proyecto se da una interacción entre el mundo real y el mundo "virtual" o "abstracto", es decir, la representación del mundo real mediante un modelo. Esta interacción cobra gran relevancia en las etapas de conceptualización, verificación y validación y será fundamental para el trabajo.

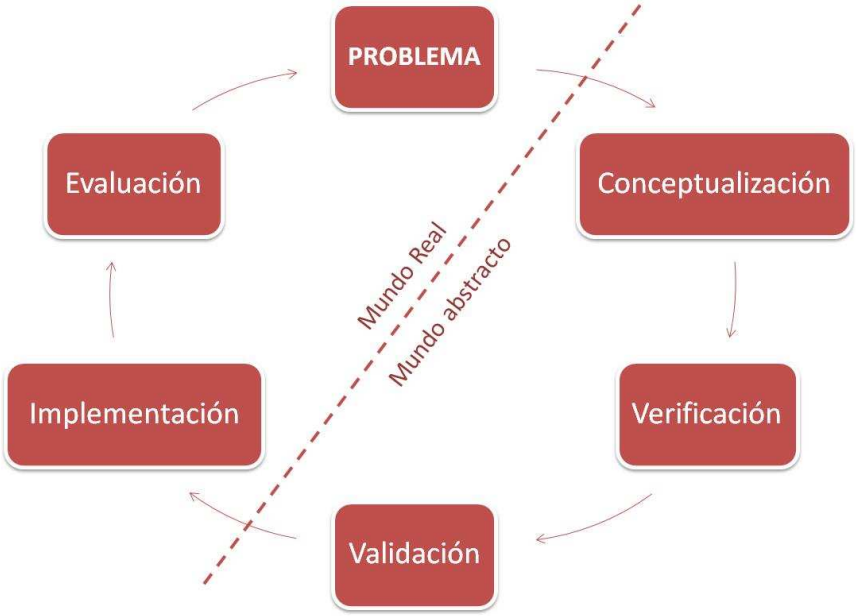

Figura I.7 – Etapas del proyecto

En la primera etapa, **problema**, lo que se hace es básicamente detectar el problema, sus raíces, cómo éste afecta al sistema; para determinar el grado de necesidad de su resolución. A continuación, se conceptualiza la situación mediante diagramas causales como el de la *Figura I.1*, entre otras cosas. La etapa de **conceptualización** también incluye la modelización del sistema. En este trabajo se comenzó por la modelización de una situación *As Is*, o sea default, tomando los parámetros necesarios para el input del modelo de un estudio sobre el tema realizado previamente por otros autores[11].En este período se busca representar de la mejor manera posible un problema real en un entorno virtual, apoyándose a un software específico. En esta etapa, se acuerdan también los límites del proyecto. Luego se encara la **verificación** del modelo, que consiste en comprobar que la simulación funcione sin ningún problema técnico y que el comportamiento del sistema no presente ninguna anormalidad. Para ello en la etapa anterior se armó el escenario base en

función a los datos utilizados por Gershenson y Pineda, de modo que se pueda verificar y **validar** el escenario base. En la fase final de la construcción del modelo se procede a adaptar el modelo para simular la situación real de una línea de colectivos de la empresa colaboradora, lo cual se puede hacer gracias a los datos provistos por ella. Una vez aprobado el modelo, se trabaja en la incorporación de distintas estrategias de control de frecuencias al modelo, algunas adaptaciones de estrategias ya creadas por autores anteriores a este estudio y otras nuevas. Ensayando diversas técnicas y comparando los resultados de cada una de ellas en distintos tipos de líneas para definir la más adecuada en cada caso se concluye con la etapa de **validación** y se pasa a la **implementación** de esta última en campo. La **evaluación** de los resultados por parte de la empresa realimentará el ciclo, pudiéndose así redefinir el problema si es necesario y repasar cada etapa del proceso.

I.5 ♦ CRITERIOS DE ÉXITO DEL PROYECTO

El éxito o fracaso del proyecto no podrá diagnosticarse de una manera terminante, ya que la escala de medida de los criterios que aquí se mencionan es decididamente gradual. De todos modos, se considerará que el proyecto ha sido exitoso si se han podido cumplir, en alguna medida, estos cuatro objetivos principales, siendo los primeros más personales e importantes para la valoración del éxito del trabajo y los últimos, algo más cercano a una expresión de deseo sobre los resultados ideales del trabajo.

1. Se priorizará que la solución generada para el problema en cuestión sea satisfactoria desde el punto de vista del autor y de los expertos en transporte público, de manera de haber trabajado en un proyecto que conforme a ambos. Se hará énfasis en que las estrategias recomendadas se pueden llevar a la práctica sin mayores complicaciones, aprovechando al máximo las tecnologías disponibles actualmente por parte de la empresa.
2. Será importante considerar si el proyecto logró o no una mejora en los indicadores que monitorean el problema a tratar, de manera de corroborar objetivamente si la solución al problema fue exitosa. El contacto con la empresa proveedora del servicio de transporte público permitirá dicha evaluación.
3. Se buscará que el proyecto genere un aprendizaje para el autor en esta temática y en el desarrollo de proyectos en general, ya que esta tesis cierra el ciclo de formación universitaria y es parte del comienzo del ciclo profesional.
4. Por último, se pretenderá que este proyecto colabore en la creación de nuevos conocimientos tanto para la universidad como para la comunidad académico-industrial argentina.

< II > ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

Como se vio hasta ahora, el problema mundial que enfrentan las empresas de transporte público consiste en determinar la forma de ofrecer una buena calidad de servicio a los pasajeros manteniendo los activos y costos de funcionamiento razonables.

Si se aborda como un todo, este problema global no es fácil de manejar. Es por eso que se ve dividido en una serie de subproblemas que se resuelven normalmente de forma secuencial en las varias etapas del proceso de planificación – la planificación estratégica, táctica y operativa – e incluso durante las operaciones (**control en tiempo real**).

Los problemas de planificación estratégica son decisiones a largo plazo, tales como el diseño de las rutas de tránsito y de las redes. La mayoría de estos problemas pertenecen a la categoría de problemas de diseño de la red y exigen la solución de problemas de asignación de pasajeros como subproblemas. Estos problemas estratégicos apuntan a maximizar la calidad del servicio bajo restricciones presupuestarias.

Los problemas tácticos se refieren a la planificación de las decisiones relacionadas con el servicio ofrecido al público, es decir, las frecuencias de servicio a lo largo de las rutas y los horarios. Estos problemas suelen resolverse sobre una base estacional, con actualizaciones de vez en cuando, y también se centran en la calidad del servicio.

Los problemas de planificación operativa se refieren a cómo las operaciones deberían llevarse a cabo para ofrecer el servicio propuesto a un costo mínimo. Incluyen una amplia variedad de problemas tales como la programación de los vehículos (*vehicule scheduling*), la programación de los conductores (*crew scheduling*), el estacionamiento y la expedición desde los garajes de los vehículos, y la programación del mantenimiento. Esta programación se realiza con cierta frecuencia, que varía y puede ser mensual para la programación del conductor a diaria para el estacionamiento de coches y la distribución. A diferencia de los objetivos de los problemas anteriores, el objetivo para el los problemas de planificación de operaciones es claramente el de minimizar el costo total.

Por último, los problemas durante la operación manejan las perturbaciones con respecto al plan mediante varias estrategias de control **sobre la marcha**. Estos problemas se resuelven en tiempo real durante las operaciones y están encaminadas a minimizar los inconvenientes para los pasajeros, mejorando así la calidad percibida del servicio.

Como se ha visto, este trabajo se avocará a este último tipo de problemas, más precisamente al problema del mantenimiento de la frecuencia de los servicios. Por ello, se verá en detalle en la próxima sección la evolución de la tecnología para esa rama, no prosiguiendo de la misma manera para lo que es la evolución en las ramas de estrategia, táctica y operaciones. De todos modos, como las cuatro ramas forman parte de un proceso integral y los avances en una no se hubiesen podido dar sin avances en el resto de las áreas se muestra en la *Figura II.1* de manera resumida los principales enfoques que se dieron a lo largo de la historia para resolver los distintos problemas del transporte público. Cada uno de los problemas mencionados en la figura tiene su larga y propia historia de evolución. Luego se verá en detalle la evolución histórica del problema que más nos interesa en este trabajo.

Figura II.1 – Enfoques de la tecnología en problemas de planeamiento estratégico, táctico y operativo.

II.1 ♦ INTRODUCCIÓN A LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL DURANTE LAS OPERACIONES

En este apartado se pretende introducir y explicar brevemente las principales estrategias de control conocidas y utilizadas hasta el momento, para poder luego mostrar la evolución de cada una de ellas a lo largo de la historia.

La *Figura II.2* muestra las seis estrategias más usadas a la hora de intentar mantener la frecuencia constante entre servicios. Como son más conocidas en el idioma inglés y hasta son usadas con esos nombres en nuestro

país dentro del ámbito del transporte, se optó por expresarlas en dicho idioma, asignándole a su vez un ícono representativo a cada una para evitar barreras de idioma.

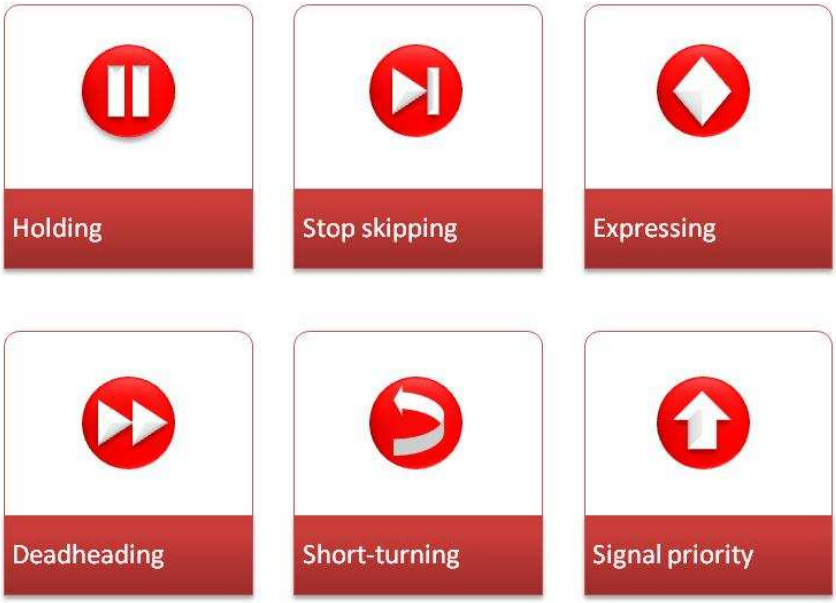

Figura II.2 – Estrategias de control de frecuencia de servicios sobre la marcha

La estrategia de control más conocida y estudiada es la de *Holding*, la cual consiste en detener el vehículo en cuestión en la parada o punto de control por un lapso de tiempo y ayuda a separar servicios que vienen muy próximos entre sí. El punto de control puede coincidir o no con una de las paradas de la línea. El holding ha sido estudiado por numerosos autores y hasta varias veces por autor ya que no solo se estudia cuándo detener al vehículo o no, sino también por cuánto tiempo mantenerlo detenido y hasta cuántos controles por línea son necesarios y dónde ubicar dichos controles. Dentro del *Holding* hay dos ramas de estudio significativas cuya distinción se basa en si se calcula el tiempo de detención del vehículo en función al horario programado (itinerario) en que dicho vehículo debe partir de la parada o si se lo hace en función a un valor umbral preestablecido. Esta estrategia es muy famosa por la facilidad de implementación que presenta frente al resto y los buenos resultados que ha ido demostrando.

La segunda estrategia de la figura, *Stop skipping*, se basa en saltear alguna parada del recorrido y sirve para separar vehículos que están muy cerca. Si dos vehículos van muy juntos se puede aplicar esta estrategia al que va al frente, o aplicar *Holding* al que va atrás, o aplicar ambas al mismo tiempo; todo depende del desvío que haya entre la frecuencia actual y la deseada. Cuando se aplica el *Stop skipping* se le comunica a los pasajeros a bordo, como mínimo una estación antes de la estación que se va a saltear, que el vehículo no se detendrá en la parada X de manera de darle la oportunidad a los

pasajeros cuyo destino es la parada X de descender del coche en la parada X-1 y tomar el próximo coche para viajar el tramo restante. La ventaja de esto es que dichos pasajeros no deberán esperar mucho al próximo coche ya que esta estrategia se aplica en los casos en que el segundo coche viene muy pegado. Si bien puede resultar molesto tener que descender y volver a tomar otro vehículo, eso es una cuestión de costumbre. Además hay una estrategia alternativa que busca minimizar esa molestia, ella consiste en detenerse en la parada X sólo para permitir el descenso de pasajeros. Lo negativo de esa alternativa es que es menos efectiva ya que sólo se ahorra el tiempo de ascenso de pasajeros en la parada X, dificultándose más la separación entre los coches. El *Stop skipping* es muy usado en los subtes y trenes de la ciudad de New York, entre otras ya que ha resultado muy conveniente. Para el caso de los colectivos, esta estrategia presenta algunos inconvenientes. En primer lugar, el sistema de boletos no está preparado para la implementación de la estrategia. Como el sistema no cuenta con plataformas separadas del tránsito peatonal común a las que se accede una vez pagado el boleto, de aplicarse, el pasajero tendría que descender del coche, ubicarse al final de la cola ya existente y al subir al próximo vehículo debería volver a abonar, lo cual no suena lógico. O el colectivero tendría que tener una manera de comprobar que el pasajero no finalizó su recorrido. En los boletos tendría que aparecer impreso el destino final, pero de todos modos aquella acción sumaría una demora al viaje. Sí se puede utilizar esta estrategia en sistemas BRT ya que éstos son muy parecidos a los trenes y subtes en los aspectos conflictivos recién mencionados. Los beneficios de la estrategia de Stop skipping incluyen la reducción del tiempo de viaje en el vehículo, de los tiempos de espera para los pasajeros ya a bordo del vehículo, y de los tiempos de espera para los pasajeros esperando en paradas posteriores. Estos beneficios son a costa de un aumento en el tiempo de espera en las paradas para las personas que se ven obligados a bajarse antes y tomar el siguiente vehículo.

En sus comienzos, *Expressing* consistía solamente en el envío de un vehículo directamente a la estación final desde el punto de control. Los pasajeros más beneficiados eran aquellos cuyo destino era esa última parada. La decisión de saltear un tramo del recorrido se tomaba sobre la marcha, por eso a esto nos referiremos cuando hablemos de *Expressing* en el trabajo. Gracias a esta idea surgieron luego los servicios denominados *express*, que desde que salen de cabecera están programados para detenerse sólo en ciertas paradas, por lo general las paradas más importantes. Estos coches realizan el mismo recorrido que uno normal pero se detienen únicamente en las paradas seleccionadas como *express*. Permite a los pasajeros que realizan viajes largos reducir su tiempo de viaje considerablemente, descongestiona los vehículos que realizan el recorrido normal, y ayuda a reducir así las demoras

en paradas por ascenso y descenso de pasajeros – que se ven incrementadas cuando los vehículos viajan muy cargados. Como se había explicado, la variación de estas demoras es una de las causas que genera desbalanceo en la frecuencia de los servicios a lo largo de una línea. El sistema de colectivos permite implementar el *Expressing* sin inconvenientes, pero esto se puede ver dificultado en redes de trenes y subtes debido a que el traspaso en sistemas de vías no es posible por default, con lo cual se requeriría un cambio en la infraestructura para poder usar esta técnica en ese tipo de transporte

La cuarta de las estrategias mostradas en la *Figura II.2* es el *Deadheading*, que se basa en enviar un coche directamente a la parada final del recorrido en un dado momento, forzando a que éste no se detenga en ninguna de las estaciones que están por delante. A diferencia de la estrategia de Expressing, en ésta todos los pasajeros deben bajarse del vehículo en el punto de control y éste viaja hasta la última parada completamente vacío. Sirve en casos en que un vehículo se distanció mucho de su precedente pero tiene un gran impacto negativo en los pasajeros. Este impacto se puede reducir, como se explicó para *Stop skipping,* si los pasajeros pueden bajarse del vehículo y tomarse el siguiente sin problemas. De todos modos la estrategia tiene otras desventajas; ese vehículo que es enviado directamente a la terminal no deja de representar un mal uso de recursos.

Short-turning es una estrategia mediante la cual se dirige al vehículo en cuestión a emprender la vuelta. Se usa en casos en los que hay tres vehículos muy próximos y al mismo tiempo un bache importante a la misma altura sobre el recorrido de vuelta, con lo cual se indica al segundo colectivo, que siempre tiene una ocupación menor que el que va al frente del pelotón, que tome la ruta de vuelta a la altura que se encuentra en ese momento, llenándose así el bache existente en ese tramo. Beneficia más que nada a pasajeros que viajan en la ruta de retorno. Otra vez, la infraestructura de sistemas sobre rieles puede dificultar la implementación de esta estrategia, mientras que los sistemas de colectivos no cuentan con esa dificultad.

La última estrategia es la de *Signal priority*. Como algunas de las anteriores, requiere una inversión inicial en estructura para poder ser aplicada y luego involucra decisiones sobre la marcha. La idea de esta estrategia es que se puedan variar los tiempos de marcha de los vehículos por medio de señales de tránsito en las intersecciones que priorizan el tránsito de éstos. Se aplica a sistemas de colectivos que interactúan con el resto del tránsito urbano, uno de los culpables de la inestabilidad de la frecuencia de servicios. Las señales de prioridad en general implican el cambio de la fase de una señal a color verde o la ampliación de la duración de la fase de color verde cuando un vehículo se acerca a una intersección.

Una vez explicadas cada una de las estrategias y su manera de funcionar se procederá a mostrar la evolución de la investigación y aplicación de cada una de ellas.

II.2 ♦ EVOLUCIÓN DEL ENFOQUE CONCEPTUAL EMPLEADO PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE INESTABILIDAD DE LA FRECUENCIA DE SERVICIOS

El objetivo de esta sección es comprender el entorno en el cual se estudia el problema y evitar caer en lugares comunes de resolución.

II.2.a – Primera generación de investigación – en ausencia de datos reales

Las primeras investigaciones sobre las operaciones de control consistían principalmente en el diseño y la evaluación de las estrategias de *Holding*. La mayoría de los estudios fueron de tipo analítico y también se usaron técnicas de simulación en ausencia de datos sobre las operaciones de tránsito reales. Una línea común en muchos de estos primeros estudios consistió en que los modelos se basaban en supuestos bastante restrictivos. Algunos de estos estudios se realizaron para sistemas de trenes, o sobre vías en general, otros para TPAU, y muchos para el transporte público en general. En este trabajo no se buscará distinguir entre unos y otros ya que el problema es uno y cada aporte que se describirá apunta al mismo problema, desde la rama que fuera. Es por esto que en vez de “tren”, “vehículo” o “colectivo” se utilizarán de aquí en adelante en esta sección palabras más generales como “vehículo” o “coche”.

HOLDING

Osuna y Newell (1972) desarrollaron un modelo para determinar la cantidad de tiempo necesario que se debía detener un vehículo con el fin de mejorar la regularidad del servicio. Se analizó una ruta hipotética que tenía en cuenta en una parada y uno o dos vehículos. El horizonte de tiempo de la simulación era infinito y asumieron la capacidad del vehículo infinita. El objetivo del modelo era reducir al mínimo el tiempo promedio de espera de los pasajeros. Formularon el problema como uno de decisión de Markov[7] y la decisión a tomar era dicotómica, detener o despachar el vehículo en función al comportamiento pasado del vehículo y a ciertas propiedades del sistema. Los autores concluyeron que el control debería llevarse a cabo tras el deterioro de servicios más que en previsión de un posible problema, y que el control debe

[7] Una **cadena de Márkov**, que recibe su nombre del matemático ruso Andrei Andreevitch Markov (1856-1922), es una serie de eventos, en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior

aplicarse con moderación para evitar el deterioro del servicio más allá de un límite tolerable. Además concluyeron que para los casos de uno o dos vehículos la estrategia óptima consistía en detener al vehículo hasta un cierto valor límite. Por último, notaron que incluso casos tan idealizados como éste resultaban difíciles de analizar y que problemas más complejos quizá requerirían mejor intuición y menos análisis matemático.

Barnett y Kleitman (1973) desarrollaron un modelo tomando como partida la investigación de Osuna y Newell. Su análisis incluyó a una ruta de vehículos hipotética con un vehículo y varias paradas. En el modelo existían uno o dos puntos de control donde se podía aplicar el *Holding*. El estudio buscaba divisar una estrategia de *Holding* que lograra minimizar los tiempos de espera para los pasajeros. Los autores concluyeron que el Holding fue más eficaz cuando los viajes volvían muy temprano, y que la ubicación del punto de control demostró ser crucial.

Newell (1974) continuó con sus estudios, esta vez se avocó a estudiar el efecto de apelotonamiento de vehículos. Consideró una ruta, dos vehículos y un punto de control. La variable de decisión fue una vez más la frecuencia umbral, es decir, el valor (Z) para el cual si la diferencia en tiempo entre el vehículo que llegaba al punto de control y su precedente (f) era menor a Z el vehículo permanecía detenido durante Z-f unidades de tiempo. En este trabajo Newell asumió que los pasajeros arribaban a una tasa constante, pero en vez de asignarle una distribución continua a las frecuencias de los vehículos usó aproximaciones de los tiempos de marcha entre las estaciones y los tiempos de demora en las paradas, derivando así una solución aproximada. Sus resultados sugirieron que un control óptimo es aquel en el cual los efectos de apelotonamiento se logran mantener bajo control.

Barnett (1974) más tarde desarrolló un modelo más detallado que analizó una ruta hipotética con varias paradas y un punto de control. El objetivo del modelo era determinar el intervalo óptimo en el que los vehículos debían ser despachados desde un punto de control. Barnett le atribuyó a las frecuencias entre servicios una distribución muy simple, discreta de dos puntos, argumentando que la manera más simple de reducir el tiempo de espera de los pasajeros en cola era emparejando las frecuencias en el punto de control. La función objetivo a minimizar ponderaba el tiempo de espera esperado para los pasajeros esperando en cola en el punto de control y la demora esperada para los pasajeros arriba del vehículo debido al *Holding*. La estrategia óptima dependía de la media y la varianza de la distribución de las frecuencias, la proporción de pasajeros a bordo del vehículo en el punto de control sobre los que esperaban abajo en las estaciones siguientes, y la correlación entre los tiempos de llegada de vehículos sucesivos en el punto de control. Esta

correlación entre sucesivos arribos representa el grado de apelotonamiento del que se viene hablando.

Bly y Jackson (1974) diseñaron un modelo de simulación en el que se examinaron los efectos del *Holding* de coches en un punto de control hasta alcanzar una frecuencia umbral, lo que se llama *Threshold-based strategy*. Bajo este tipo de estrategia, un vehículo es detenido hasta que la separación entre él y su predecesor alcanza ese valor umbral preestablecido. Los resultados del estudio mostraron que la estrategia resultó en una reducción de los tiempos de espera, a expensas de los tiempos totales de viaje.

Barnett continuó sus estudios sobre el Holding y en 1978 consideró otro sistema rudimentario con sólo un vehículo de capacidad infinita, en el cual todos los pasajeros se subían en la misma estación y tenían la misma estructura de costos de viaje. Se modeló la interacción entre los pasajeros y la empresa de transporte como un juego de mutua cooperación; en el que los pasajeros intentaban minimizar su costo de espera en base a características de servicio y la empresa, sujeta a restricciones presupuestarias, trabaja de minimizar el costo relacionado al tiempo de los pasajeros. Basándose en este modelo Barnett obtuvo la política óptima de *Holding* analíticamente.

Turnquist y Blume (1980) desarrollaron un conjunto de ecuaciones que buscaban determinar los límites superior e inferior de los beneficios esperados para las estrategias de *Holding* basadas en un valor umbral. Argumentaron que el Holding sería más efectivo en casos en que las sucesivas frecuencias de arribos tuvieran una correlación inversa perfecta (a una corta frecuencia le siguiera una larga frecuencia) ya que al detener el vehículo debido a una frecuencia corta entre él y su predecesor se reduciría la frecuencia larga subsiguiente. Por el contrario, los peores resultados para la estrategia de Holding se obtendrían en los casos en que los tiempos entre sucesivas llegadas fueran independientes. Utilizaron la misma función objetivo que Barnett en su trabajo de 1974. Ellos demostraron que el punto de control óptimo a lo largo de una ruta se encuentra donde hay relativamente pocos pasajeros a bordo del vehículo y muchos están esperando en las paradas siguientes. Los autores señalaron que el control debe aplicarse lo más pronto a lo largo de la ruta como sea posible porque la variabilidad de las frecuencias tiende a aumentar con el tiempo de ejecución. Un resultado importante del estudio fue que los autores descubrieron casos en los que es poco probable que el control de las frecuencias produzca beneficios y en realidad podría resultar perjudicial para las operaciones de tránsito.

EXPRESSING & SHORT-TURNING

Macchi (1989) presentó el primer trabajo de investigación sobre la estrategia de *Expressing*. Él analizó los diferentes grupos afectados por la estrategia. Basándose en la *Green Line* de Boston propuso un primer lineamiento para dicha estrategia en función a las frecuencias anteriores y posteriores de un vehículo. Como una simplificación asumió al tramo de avance rápido como predeterminado y a la frecuencia de ese último tramo constante. Sus estudios demostraron que la estrategia de *Expressing* sólo servía en los casos en que la frecuencia siguiente era corta. De todos modos, la estrategia de Macchi era local en vez de global debido a la poca información utilizada y sus simplificaciones hicieron que el modelo fuera poco aplicable en un contexto más general.

Adoptando un enfoque similar al de Macchi, Deckoff (1990) estudió la estrategia de *Short-turning* en la *Green Line.* Él también asumió que la frecuencia no variaba del punto de control hacia adelante en el recorrido y consideró hacer dar la vuelta a un solo tren en el punto de control. Contando con datos de una simulación Monte Carlo [8] elaboró lineamientos para inspectores de línea para que ellos pudieran tomar la decisión de hacer dar la vuelta a un vehículo en función a una serie de frecuencias. Sus resultados sugirieron que *Short-turning* sería beneficioso en los siguientes dos casos. En primer lugar, al hacer dar la vuelta al segundo vehículo cuando dos vehículos consecutivos llegaban con una frecuencia muy corta. En segundo lugar, si el candidato para *Short-turning* tenía una frecuencia con respecto al anterior más o menos larga pero estaba cerca del punto en el que se permite dar la vuelta y tendría una larga separación con el de adelante también en la ruta de regreso. Como Macchi, la investigación de Deckoff estaba fuertemente basada en las operaciones de *Green Line* y por lo tanto su estrategia de *Short-turning* resultó muy local.

Tanto Macchi como Deckoff encontraron que el uso de sistemas de localización automática de vehículos ayudaría en gran medida al desarrollo de mejores decisiones para las estrategias de *Expressing* y *Short-turning*.

STOP SKIPPING &SIGNAL PRIORITY

Koffman (1978) desarrolló un modelo de simulación simplificado de análisis de cuatro estrategias de control diferentes para una ruta de vehículo. Las estrategias incluidas eran *Holding*, *Stop skipping*, *Signal priority* y la reducción de la incertidumbre en el despacho. El modelo es digno de mención

[8] El **método de Monte Carlo** es un método no determinístico o estadístico numérico usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud.

ya que tuvo en cuenta la señalización en el tráfico, diferentes tasas de ascenso y descenso al vehículo, demoras por la aceleración / desaceleración del vehículo, y la variabilidad de la demanda de pasajeros. De manera similar a Bly y Jackson, Koffman llegó a la conclusión de que el Holding produce mejoras muy pequeñas en los tiempos de espera, a expensas de los tiempos de viaje de los pasajeros.

PRINCIPALES CONTRIBUCIONES DURANTE LA PRIMERA GENERACIÓN

- El *Holding* impone costos en los pasajeros a bordo de los vehículos, manifestados como un aumento en el tiempo de viaje promedio.
- El *Holding* también impone costos para las empresas proveedoras del transporte público en la forma de mayores tiempos de recorrido.
- La ubicación del punto de control es crucial a la hora de minimizar la demora agregada por el *Holding*.
- La estrategia de Holding resulta útil cuando la carga de pasajeros en el punto de control es baja y la demanda de pasajeros inmediatamente después del punto de control es alta.
- El *Holding* reduce los tiempos de espera en cola de manera muy efectiva para pasajeros en paradas posteriores y cercanas al punto de control.
- Pero la variabilidad de las frecuencias comienza a incrementarse otra vez luego del punto de control.
- En ciertas situaciones la estrategia de *Holding* puede resultar perjudicial.

II.2.b – Segunda generación de investigación – contando con datos reales

La principal diferencia entre la primera y segunda generación de estudios de control de las operaciones es que estos últimos son empíricamente validados con datos sobre las operaciones de tránsito real. Esto fue posible gracias al avance en el uso de bases de datos y la mayor tendencia a la recopilación de información. Para esta generación no se verán por separadas las evoluciones de cada tipo de estrategias ya que la mayoría de los estudios comenzaron a involucrar más de una estrategia a la vez.

Turnquist y Bowman (1980) desarrollaron un modelo utilizando datos de una ruta de vehículo en Evanston, Illinois, para dedicarse al estudio de la estrategia de *Holding* basada en el itinerario (*Schedule-based holding*). Basándose en un itinerario teórico, los vehículos que llegaban temprano eran retenidos hasta cumplirse su horario programado de salida del punto de control.

Los autores encontraron que la estrategia resultaba para los recorridos de larga distancia.

Un estudio realizado por Abkowitz y Engelstein (1984) analizaron estrategias de *Holding* basadas en la variación de la frecuencia en detalle. El estudio utilizó una simulación con datos de Cincinnati, Ohio, y los resultados fueron validados más tarde con datos de Los Ángeles, California. Se desarrolló un algoritmo para identificar los lugares en donde se podrían lograr las mayores reducciones en los tiempos de espera de pasajeros con valores umbrales para las frecuencias específicos. Los autores encontraron que el punto de control óptimo depende de la proporción de pasajeros a bordo del vehículo sobre los que están esperando abajo desde el punto de control en adelante y que los pasajeros más beneficiados serían los que se encontraran en las paradas inmediatas al punto de control.

Un estudio posterior por Abkowitz, Eiger, y Engelstein (1986) encontró que la variación de la frecuencia no aumenta linealmente a lo largo de una ruta, sino que se incrementa considerablemente en un principio y luego se balancea en determinado valor una vez que los vehículos se apelotonaron completamente. Para ello desarrollaron un modelo empírico basado en una simulación Monte Carlo en donde se calculaba el tiempo de espera en una parada para pasajeros como función de la media y varianza de la frecuencia en esa parada.

En un informe centrado en las estrategias para mejorar la fiabilidad del servicio de tránsito Turnquist (1982) analizó al mismo tiempo el Holding basado en un itinerario y basado en un valor umbral de frecuencias. El estudio se basó en una simulación más tarde validada con datos de Evanston, Illinois, y de Cincinnati, Ohio. El autor analizó dos tipos de estrategias de control. La estrategia "*Single Headway*" que requería información acerca de la frecuencia actual y simplemente consistía en mantener un vehículo detenido hasta que se cumpliera el tiempo preestablecido en el itinerario. La segunda estrategia se llamó "*Prefol*" y consistía en mantener detenido el vehículo hasta que su frecuencia se acercara lo más posible a la frecuencia estimada para el vehículo siguiente. La estrategia *Prefol* requería más información que la estrategia *Single Headway* porque se necesitaba realizar una predicción del tiempo de llegada del siguiente vehículo a la parada en cuestión. Turnquist encontró que la última estrategia es menos efectiva que la *Prefol* cuando las llegadas de los vehículos son independientes unas de otras. A medida que los tiempos entre arribos están más correlacionados, los resultados de la estrategia *Single Headway* comienzan a acercarse a los de la estrategia de *Prefol*.

Según Turnquist (1982), para que la estrategia de control de frecuencias que maximizara el ahorro de tiempo sería necesario conocer de antemano todos los intervalos de tiempo entre llegadas de vehículos. A su vez, sus dos estrategias no ofrecen soluciones óptimas ya que no tienen en cuenta el efecto del *Holding* de un vehículo sobre el resto que está en la ruta. Así y todo Turnquist encontró que las estrategias de Holding son sensibles a tres características del punto de control:

- el nivel actual de falta de confianza en los datos,
- el grado de correlación entre sucesivas frecuencias,
- y porcentaje de pasajeros a bordo del vehículo en el punto de control en relación a los pasajeros esperando en paradas siguientes.

Abkowitz y Lepofsky (1988) analizaron el control durante operaciones basado en variaciones de las frecuencias para dos rutas de vehículos en Boston, Massachusetts. El control se ejercitó tanto en la dirección de entrada a la ciudad durante la hora pico matutina como en la dirección de salida de la ciudad durante la hora pico de la tarde. De los tres experimentos que hicieron, sólo uno de ellos lograba reducir significativamente la varianza de la frecuencia y de los tiempos de viaje. El que resultó ser un recorrido radial que interceptaba el centro de la ciudad. El estudio se vio obstaculizado por problemas de recopilación manual de datos y porque los supervisores de campo no aplicaban las instrucciones de control consistentemente. En los casos de los dos experimentos en los cuales el control resultó ineficaz, se descubrió que los supervisores de campo sólo detuvieron un porcentaje de los vehículos cuando tal acción se justificaba (Abkowitz y Lepofsky, 1988). Esto demuestra que factores de comportamiento human pueden reducir la efectividad de las estrategias de control si éstas no son implementadas correctamente. Aunque los resultados de este estudio fueron variados, no deja de ser importante, ya que sienta las bases para la evaluación de experimentos de control bajo contextos específicos basándose en datos reales que surgen de las operaciones.

Turnquist (1989) estudió el recupero de los desvíos sobre los tiempos programados con información real y actual sobre la ubicación de los coches. En vez de usar la técnica del Holding, utilizó técnicas de control de la velocidad de los vehículos en varios tramos de la ruta.

Wilson et al. (1992) llevaron a cabo un estudio que analizaba los beneficios de las operaciones de control para la Línea Verde MBTA en Boston, Massachusetts. El estudio examinó cuatro tipos de acciones de control: 1) *Holding*; 2) *Short-turning*, 3) *Expressing*, y 4) *Deadheading*. El mayor problema

operativo que enfrentaba la Línea Verde consistía en la variación de las frecuencias. Hasta el momento los supervisores de campo llevaban a cabo acciones de control basándose en la observación directa, la comunicación y la intuición. Los autores encontraron que algunas de las acciones de control aumentaban de hecho los tiempos de espera total de los pasajeros, mientras que otras no se aplicaban cuando se justificaban. La razón que se le atribuyó a la variación tan amplia en la eficacia de las operaciones de control fue la falta de información oportuna a disposición de los supervisores de campo. Uno de los aspectos más interesantes de la investigación fue que los autores desarrollaron un sistema de reglas basadas en la ubicación y otras condiciones específicas para las acciones de control.

Cabe recalcar que el estudio de Wilson et al. (1992) trataba varios tipos de estrategias de control que no habían sido ampliamente tratadas en la literatura hasta el momento. Entre otras, la de *Stop skipping, que e*n esencia representa una transformación de servicios regulares a servicios limitados en tiempo real. Sólo dos estudios han analizado dicha estrategia en detalle, uno de ellos la considera una acción de control razonable y el otro recomienda que se evite por completo debido a efectos adversos para determinados pasajeros (Wilson et al, 1992; Lin et al, 1995).

Por otro lado, dentro de lo que es la investigación de otra de las estrategias de control, *Signal priority*, varios investigadores han encontrado que las intersecciones señalizadas que permiten prioridad de paso a los vehículos son una importante contribución a la calidad de servicio de éstos (Welding, 1957; Abkowitz y Engelstein, 1983). Si bien no es la intención de este trabajo discutir las estrategias de *Signal priority* en detalle, es importante señalar por qué esta estrategia está consiguiendo votos a favor dentro de la comunidad de tránsito. En contraste con el *Holding*, que siempre genera retraso para algunos pasajeros y también se traduce en mayor tiempo de viaje para los vehículos, *Signal priority* reduce tiempos de viaje y reduce las demoras para todos los pasajeros (Khasnabis et al., 1999). Sin embargo, ésta estrategia también impone costos adicionales a los generales de tráfico de vehículos automotor, como ya se dijo, y también puede afectar negativamente las operaciones de intersección de las rutas de vehículo. Lin et al (1995) concluyen en su trabajo que un óptimo control de las señales de tránsito del sistema incorporaría información en tiempo real sobre las operaciones de tránsito y las condiciones de circulación general, y sería capaz de responder a las condiciones de funcionamiento cambiantes y de reducir al mínimo las interrupciones del flujo de tráfico.

Una autora digna de nombrar es Eberlein, quien presentó en 1995 el primer trabajo de investigación involucrando las estrategias de *Deadheading*,

Expressing y *Holding* y aplicándolas durante las operaciones tanto de manera separada como combinada. Ella definió dos tipos de modelos determinísticos para describir dos sistemas de tránsito alternativos: uno general y uno fijo, basado en una versión simplificada del sistema general con algunos parámetros fijos. Por ejemplo, en el sistema fijo la tasa de arribo de pasajeros y las demoras tomaban el mismo valor fijo para todas las paradas. En el caso del sistema general, los tiempos de marcha entre estaciones y las tasas de arribo de pasajeros eran determinísticos pero variaban según la estación. Si bien Eberlein hizo el modelo determinístico, los valores que se asignaron a los parámetros fueron bastante similares a la realidad. Basándose en éste modelo, ella aplicó las tres estrategias ya mencionadas a los sistemas, tomando información en tiempo real sobre la ubicación de los vehículos como input. Buscó minimizar el tiempo total de espera para los pasajeros como objetivo. Para simplificar el problema consideró capacidades infinitas para los coches y una estructura de una sola vuelta como recorrido. Como la función objetivo del modelo no era lineal y tenía restricciones no lineales resultó difícil de solucionar, Eberlein tuvo que desarrollar una heurística para resolverlo, y poco práctico para realizar controles en tiempo real. De todas formas, su modelo proporcionó una base sólida de estudio en el tema.

Al mismo tiempo que Eberlein realizaba su trabajo, Li (1994) condujo una investigación relacionada, que trataba el del problema de despacho de vehículos sobre la marcha. Su contexto consistía en una ruta muy saturada con frecuencias teóricas extremadamente altas (cada 1-2 minutos se despachaba un coche) cuyo único punto de control estaba ubicado en la terminal, cosa que suele suceder en operaciones reales. Con diferentes niveles de información en tiempo real sobre la ubicación de los vehículos se estimaron los tiempos de arribo a la terminal para cada uno. El objetivo del estudio era minimizar los tiempos de espera de los pasajeros. La decisión de despacho consistía en optar por un tiempo de despacho y una forma de operar la ruta, entre un pequeño grupo de opciones que incluían estrategias de *Short-turning* y *Stop skipping.* Li desarrolló dos modelos, el primero determinístico con hipótesis similares a las de Eberlein, y el segundo estocástico. Éste asignaba a parte del tiempo de viaje y de las longitudes de cola iniciales valores estocásticos. Li asumió la parte aleatoria de los tiempos de viaje como idéntica para que las frecuencias siguieran siendo determinísticas. De modo de simplificar el modelo Li preestableció demoras constantes y cantidad de pasajeros viajando entre cada par origen-destino posible también constante. Desgraciadamente estas simplificaciones importantes y la estructura de decisiones limitadas hicieron que el modelo de Li no pudiera ser ampliamente aplicado.

Furth (1995) retomó el problema planteado por Turnquist (1989) pero consideró usar estrategias de *Holding* para recuperar los desvíos sobre los

tiempos programados de viaje a lo largo de la ruta, una vez que éstos ocurrieran. La función objetivo que planteó era la suma de los tiempos de espera de pasajeros y las demoras causadas por la detención de los vehículos. Las variables de decisión eran, por otro lado, la cantidad de vehículos sobre la que se dividiría la demora (*Holding*) y el tiempo de demora que se asignaría a cada uno de esos coches. Furth comparó sus resultados contra los que surgían de no ejercer ningún control sobre el sistema y concluyó que si bien los beneficios no eran grandes, eran lo suficientemente buenos como para justificar la incorporación del control automático de vehículos. A su vez, sugirió que el uso de información en tiempo real ayudaría a tomar mejor las decisiones de detención.

Las estrategias de Furth eran reactivas, ya que el control era aplicado una vez desbalanceada la línea en algún sector y los vehículos que elegía controlar eran los que quedaban atrás del desbalanceo. O'Dell (1997,1999) demostró que si se controlan los vehículos que quedan por delante del desbalanceo la situación mejora, y también que si el control es preventivo mejora aún más. Ella armó modelos tomando las estrategias de *Holding* y *Short-turning* basándose en los sistemas (general y fijo) definidos por Eberlein. En su formulación, tuvo en cuenta la capacidad de los coches, lo cual fue un paso importante de acercamiento con la realidad. O'Dell se concentró en la restauración de la frecuencia luego de un bloqueo en una línea, y validó su modelo con la *MBTA Red Line*. Además de las asunciones determinísticas que hizo Eberlein, ella supuso conocida la duración del bloqueo o la interrupción. Para la estrategia de Short-turning el vehículo candidato a ser enviado a pegar la vuelta y la parada en la cual se permitía dar la vuelta eran predeterminados. Además usó aproximaciones lineales para evitar la función objetivo no lineal de Eberlein y todas las restricciones que utilizó fueron lineales. Por lo tanto, su planteo pudo ser resuelto con cualquier optimizador lineal y terminó siendo más práctica para ser usada durante la operación. Otro aspecto a destacar del planteo de O'Dell es que consideró líneas con dos ramales. Luego de testear los modelos variando la duración del bloqueo, concluyó que Holding lograba reducir entre 15% y 40% los tiempos de espera de los pasajeros. Sin embargo, estos valores podrían haber sido sobrestimados ya que no se tuvo en cuenta el aumento del tiempo a bordo para los pasajeros. En el caso del Short-turning, los resultados de O'Dell mostraron que cuanto más largo era el bloqueo, dicha estrategia otorgaba mayores beneficios.

PRINCIPALES CONTRIBUCIONES DURANTE LA SEGUNDA GENERACIÓN

- Es probable que el Holding resulte más eficaz si se realiza en los puntos tempranos de una ruta.

- Los factores humanos desempeñan un papel importante en el éxito o el fracaso de las prácticas de control.
- Se deben desarrollar reglas de decisión para ayudar a los supervisores de campo en la toma de decisiones a la hora de aplicar medidas de control o no.
- Las estrategias de control deben ser analizadas utilizando datos de las operaciones de tránsito real.
- Las estrategias de *Short-turning*, *Stop skipping* y *Deadheading* son la segunda mejor solución porque en ellas los pasajeros se ven obligados a cambiarse a otros vehículos.
- *Signal priority* no impone costos negativos en los pasajeros ni en los operadores de tránsito, pero sí en el tránsito general automotor y posiblemente también en otras líneas de vehículos que se cruzan.

II.2.c – Actual y próxima generación

A primera vista hay dos áreas que necesitan mayor profundidad de estudio: la evaluación del tiempo de espera de pasajeros y la incorporación de la capacidad de asientos de los vehículos en los modelos de control de operaciones.

Los estudios anteriores han supuesto que la función de utilidad para el tiempo de espera es lineal, lo que implica, por ejemplo, que la inutilidad de una demora 5 minutos es equivalente a cinco retrasos de 1 minuto. Además, los tiempos a bordo de los vehículos y fuera de ellos a menudo han sido tratados por igual a la hora de evaluar los beneficios del control. Investigaciones han demostrado que los viajeros valoran mucho más el tiempo de espera en las paradas que el tiempo en movimiento arriba del vehículo (Kemp, 1973; Lago y Mayworm, 1981; Mohring et al., 1987). La incorporación de diferentes ponderaciones para el tiempo de espera abajo y arriba de un vehículo es probable que influya en la identificación de la ubicación óptima de los puntos de control.

Otro aspecto importante para el control basado en la variabilidad de los tiempos entre arribos de vehículos es la disponibilidad de asientos de éstos. Abkowitz y Tozzi (1987) encontraron que ésta era una omisión importante en los estudios anteriores. Esto se debe a que al tener los coches una capacidad limitada, los pasajeros se verían forzados a esperar al próximo coche cuando el primero en arribar se encuentra lleno. Y por ende los beneficios calculados para los pasajeros en muchos estudios pueden llegar a estar mal calculados, resultando así incorrectas las acciones de control aplicadas o recomendadas. El estudio MBTA por Wilson et al (1992) y el trabajo de O'Dell (1999) son los

únicos análisis que se conocen que hayan tenido en cuenta las limitaciones de capacidad de los vehículos.

Por otro lado, con el crecimiento de las tecnologías disponibles que podrían facilitar el control sobre la marcha se abre una nueva ventana de posibilidades para control, que deberían entrar en juego en los modelos. Los puntos de control y los estudios de su óptima ubicación quedan en el olvido frente a los avances en la tecnología que se vienen dando. Si bien estas tecnologías apuntan a facilitar la implementación de la acción de control, terminan a su vez posibilitando la aparición de nuevas estrategias de control. Estamos en presencia de información en tiempo real, ahora más que nunca. A continuación se mencionarán algunas de las tecnologías surgidas para darnos una idea de qué tan alto podemos volar con las estrategias y los modelos hoy en día.

Una de las primeras tecnologías en surgir fue APC (*Automatic Passenger Counter).* Una tecnología que no ha sido plenamente explotada para las operaciones de control. Esto se debe a que los sistemas de APC en Estados Unidos no producen los recuentos de viajeros confiables en tiempo real (Levinson, 1991). Los datos de APC se encuentran normalmente sujetos a una considerable cantidad de post-procesamiento antes de ser considerados lo suficientemente confiables para la planificación de servicios y la programación. Si se contara con la capacidad de generar información precisa sobre la carga de pasajeros en tiempo real, se tendría uno de los parámetros clave necesarios para estimar los potenciales beneficios de cada estrategia de control. Eso sí, para elaborar las estimaciones del número de pasajeros que esperan en paradas a lo largo del recorrido, datos archivados de APC y datos de las operaciones pueden ser usados para construir los perfiles de subida y bajada en cada parada y para cada viaje.

Otra tecnología que surgió no hace mucho fueron los sistemas de AVL (*Automatic Vehicle Location*). Éstos se basan en el uso de GPS, las redes celulares como conectoras y computadoras con el software específico que requiera la tarea a desarrollar. Se habla de software específico ya que los sistemas AVL se usan para todo tipo de tareas logísticas, desde despachos de envíos hasta reordenamiento de una flota de colectivos, si bien en Argentina casi no ha sido explotada esta posibilidad aún. Básicamente los sistemas de AVL se podrían usar para generar información en tiempo real sobre las distancias en tiempo entre vehículos. Además la computadora que procesa la información podría estar ubicada en una central de tránsito o en los coches, permitiéndole al conductor modificar su conducta en función a la distancia que tiene con respecto a su predecesor y sucesor según lo que la pantalla le muestra. Éste es un ejemplo de una estrategia preventiva, ya que no se

esperaría a que se dé la inestabilidad del sistema para tomar las decisiones de control necesarias. Esta idea es consistente con lo dicho por Welding (1957), quien estableció la necesidad de identificar el inicio de la irregularidad y la necesidad de restaurar el servicio a la normalidad lo antes posible, y también con lo dicho por Turnquist (1982), quien sostuvo que uno de los propósitos de las operaciones de control era, antes que nada, prevenir la formación de pelotones.

Lo que se quiere mostrar con esto es que gracias a las nuevas tecnologías que pueden llegar a proveer datos entendibles sobre las operaciones en tiempo real la brecha entre el contexto analítico y el de toma de decisiones aplicada se ha achicado en una forma significativa. Es por ello que los estudios que se realizan hoy en día no se quedan en el mero análisis, sino que buscan siempre poder ser aplicados en campo.

Por último, otra herramienta no tan novedosa, que puede facilitar el estudio de las estrategias de control durante la operación de un transporte público, es ni más ni menos la simulación. Si bien la gran mayoría de los autores mencionados hasta el momento utilizaron la simulación para estudiar los sistemas de transporte público y sacar conclusiones sobre la conveniencia o no de usar ciertas estrategias para mitigar el problema en cuestión; la simulación en sí fue evolucionando a lo largo del período de estudio que abarcamos en esta sección, permitiendo mayor detalle y dando más posibilidades para el estudio. La fuerza de la simulación radica en que puede ayudar a reducir aún más esa brecha entre lo analítico y lo aplicado. A continuación se verá en qué grado la simulación puede actualmente ser útil a la hora de estudiar el problema que compete a este trabajo.

II.2.d – Simulación como herramienta de análisis y resolución

Los modelos de simulación se vienen creando para resolver cada tipo de problema del transporte público que se describió al comienzo de esta sección y se desprende de la *Figura II.1*. Hay modelos para planificar el despacho de choferes/coches, para diseñar líneas y hasta redes completas de transporte en una ciudad. Los modelos de simulación más recientes usan un enfoque multi-agente, que incluye a varios grupos de agentes[9], y logran representar una ciudad completa en la cual interactúan automóviles, peatones, choferes, colectivos, subtes, trenes, entre otros.

En el estado actual, la simulación puede presentar un enfoque relativamente reciente para el problema de la inestabilidad de la frecuencia de los servicios en el TPAU. Los primeros desarrollos en el tema se realizaron

[9] Entes con ciertas características y reglas de comportamiento similares.

hace unas dos décadas, pero la aplicación directa de esta herramienta en las empresas de transporte público para tener un apoyo en la toma de decisiones en las operaciones está todavía muy por debajo de lo deseable. Por inconvenientes presupuestarios o resistencia al cambio la mayoría de estas empresas sigue basándose en la experiencia y las reglas simples, salvo algunos casos que se dan en países del primer mundo. Por tal razón, se pretende en la presente tesis, atacar el problema mediante una metodología novedosa.

Los usos de modelos de simulación para analizar y resolver este tipo de problemas pueden agruparse principalmente en dos categorías (Ver *Figura II.3*).

Por un lado, se puede usar el modelo básicamente como un funcional avanzado y más complejo; es decir, se crea un modelo que refleje las restricciones necesarias y se usa para evaluar alternativas de solución, devolviendo un valor definido para cada una de las opciones (por ejemplo, el tiempo de espera promedio de los pasajeros en cola). El modelo pasa de ese modo a ser un evaluador de soluciones factibles, tal como el funcional en programación lineal[10]. En estos casos, las técnicas que pueden usarse para optimizar van desde el Método Simplex[11] hasta heurísticas de optimización más complejas como por ejemplo los Algoritmos Genéticos[12].

Por otra parte, el modelo de simulación puede emplearse para analizar el sistema desde la observación y la verificación de las restricciones, y evaluar su comportamiento frente a los distintos escenarios que se pretenda plantear – en el caso de la tesis, serán las distintas estrategias de control. Esto sirve principalmente cuando los tiempos y operaciones involucrados no son determinísticos, sino que presentan ciertas distribuciones de probabilidad que pueden averiguarse o estimarse. En estos casos, los resultados del sistema son inciertos y de muy difícil – sino imposible – cálculo directo, por lo que un modelo permite observar lo que sucede realmente en el sistema mediante un análisis estocástico. De esta forma, no se emplea al modelo como optimizador sino como verificador, elemento de corrección y evaluador, que emula el sistema y los resultados que se obtendrán si se aplica una u otra política.

[10] La **Programación Lineal** es un procedimiento o algoritmo matemático mediante el cual se resuelve un problema indeterminado, formulado a través de ecuaciones lineales, optimizando la función objetivo, también lineal. Principal fundador de la técnica: George Dantzig.

[11] Método creado por George Dantzig en 1947 para resolver problemas lineales.

[12] Algoritmos creados por John Henri Holland en 1970 que se inspiran en la evolución biológica y su base genético-molecular.

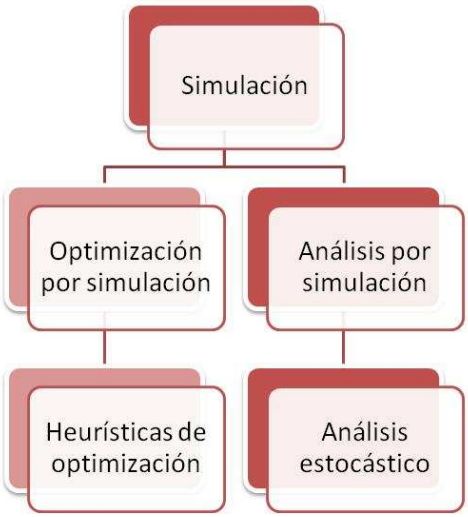

Figura II.3 – Resumen de posibilidades brindadas por la simulación

De ésta última forma se empleará el modelo de simulación en el trabajo presente. Tomando provecho de las herramientas de animación, entre otras, que incluyen muchos de los software de simulación actuales, se buscará usar el modelo como una plataforma en la cual se puedan testear distintas estrategias de control y comparar resultados. Todo esto se detallará más adelante.

< III > DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la sección *I.1.a* se introdujo el problema a tratar junto con sus causas y efectos principales. En esta Unidad se entrará más en detalle, intentando que no quede ningún aspecto del tema de estudio sin aclarar debidamente.

III.1 ♦ CONCEPTOS BÁSICOS Y TERMINOLOGÍA

Para poder definir con precisión el problema y estudiar luego la solución propuesta, hace falta acordar previamente algunos conceptos y terminología referente al tema. Se hará mención de las principales características dentro de la operación de colectivos. Éstas pueden llegar a resultar ya conocidas, porque son parte de nuestro día a día, pero no se puede dejar de nombrarlas ya que son la base sobre la cual se harán los análisis a lo largo del trabajo.

- **Nivel o calidad de servicio**: los pasajeros se verán atraídos por distintos niveles de servicio y precios de boletos. El nivel de servicio está constituido por:
  - La densidad de la red de rutas y las distancias entre paradas, que determinan la accesibilidad del pasajero.
  - La frecuencia de servicio, relacionada a los tiempos de espera para los pasajeros.
  - El período de operación (h/día, días/semana)
- **Tiempo total de un viaje**: representa el tiempo completo destinado por el pasajero para viajar de origen a destino. Está dividido en varios componentes, los cuales no son valorados por igual por los pasajeros:
  - Tiempo de acceso inicial, del origen a la parada o terminal donde se aborda el colectivo.
  - Tiempo de espera en cola, incluye los tiempos de traslado cuando se toma más de un colectivo.
  - Tiempo de viaje propiamente dicho, en el vehículo.
  - Tiempo de acceso final, desde que se desciende del vehículo hasta el destino final.
- **Patrones de ruta y servicio**: tienen que ver principalmente con qué tan frecuente para el vehículo, si la ruta es fija o no y su longitud. Los más vistos son:
  - Servicio normal, es el servicio común de colectivos que tiene paradas frecuentes a lo largo de la ruta entera.
  - Semi-rápido, las paradas son menos frecuentes que en el caso del normal.

- Expreso, puede tener un número pequeño de paradas o directamente no parar nunca desde el comienzo hasta el fin de su recorrido.
- Local, cubre un área o localidad determinada y generalmente se busca que esté conectada a algún servicio de mayor distancia, el cual puede ser otro colectivo o un tren por ejemplo.
- Flexible o *Dial-a-bus*, se utiliza más en áreas de baja densidad. Las rutas y los servicios se arman en función a la demanda.

► **Capacidad nominal de los vehículos**: como ya se mostró en la Tabla I.1, distintos tipos de vehículos ofrecen la posibilidad de transportar distintas cantidad de pasajeros. Dentro del servicio de colectivos hay una amplia variedad de alternativas, con sus respectivas capacidades. Entre ellos se encuentran:

- *Minibus*, capacidad de entre 10 a 17 pasajeros, y 4 a 6 metros de largo.
- Piso único, son los más utilizados en la Ciudad de Buenos Aires, su capacidad ronda las 60 personas.
- Doble piso, admiten entre 70 y 100 pasajeros. En Argentina se usan más para viajes de larga distancia.
- Articulados, pueden admitir hasta 150 pasajeros. Recién el año pasado empezaron a aparecer los primeros en la Ciudad de Buenos Aires. Una complicación que presentan es su largo, que requiere de cierto radio de giro difícil de conseguir dentro de la ciudad.

► **Velocidad de operación:** no depende solamente de las características mecánicas del vehículo, sino también del tránsito y los semáforos, principalmente. Como ya se ha visto, esta cualidad le juega muy en contra al sistema de colectivos a la hora de compararlo con otros sistemas de transporte público.

A partir del estudio y determinación de estos factores para una línea en particular se llegan a armar las dos herramientas claves para la operación de los colectivos, que son:

► La diagramación de vehículos, la frecuencia de vehículos puede llegar a variar a lo largo del año, del mes y hasta del día.

► La diagramación de la flota, que se hace obviamente de manera conjunta con la anterior. Con respecto al personal, hay varios factores a determinar, a saber:

- Duración de los recesos
- El tiempo máximo de manejo antes y entre recesos
- Tiempos de tome y deje del vehículo
- Cambios de vehículo durante la jornada
- Tiempo máximo de manejo en una jornada

Ahora bien, una vez que la línea ya posee sus itinerarios o diagramas va a destinar todos sus esfuerzos a cumplirlos. Hay empresas que se concentran tanto en esto que pierden de vista que hay otras maneras de lograr un buen servicio. Así surge una puja entre los que plantean como objetivo primordial el cumplimiento del itinerario y los que creen más importante mantener los colectivos separados de manera pareja. Se desarrollará la relevancia de cada cuestión en el próximo apartado.

Finalmente, es oportuno adelantar aquí la terminología básica de un modelo de simulación empleado para realizar el análisis del tema. El **modelo de simulación** propiamente dicho es la aplicación o programa que refleja un modelo conceptual previamente discutido y permite imitar el comportamiento de un sistema real durante cierto período de tiempo. El modelo usualmente toma valores de ciertas **variables de entrada**, simula, y devuelve valores para ciertas **variables de salida**.

Un **experimento** (o **experimento de simulación**) es una forma de introducir las variables de entrada a dicho modelo para analizar sus resultados. Una **corrida** es la simulación de todo el horizonte temporal simulado una única vez. El **step** es el paso dentro de una corrida, cada un *step* el programa realiza todas las operaciones que el código le indica. Cuando el modelo posee predominancia de variables estocásticas o cuando se busca optimizar una función objetivo, los experimentos suelen implicar una gran cantidad de corridas.

III.2 ♦ EL PROBLEMA

"En gran parte del tercer mundo, los colectivos son vistos como **ineficientes y azarosos**, así como la principal fuente de contaminación y ruido." *Bus Systems for the Future, revista de International Energy Agency, 2002.*

Como se puede ver, lo primero que le viene a la cabeza a la población cuando debe referirse al TPAU es su falta de satisfacción con el servicio debido a la variabilidad de los tiempos entre servicios. Ambos adjetivos resaltados se refieren a ésta problemática. "azarosos" claramente denota que no se puede saber dentro de cuánto tiempo llegará un colectivo estando en la parada, el tiempo de espera para un pasajero puede variar ampliamente, lo cual nos lleva

al segundo adjetivo. “ineficientes” surge del hecho de que bajo estas circunstancias los colectivos no llegan a satisfacer eficientemente la necesidad del cliente, que es llegar a destino en el mínimo tiempo posible. Esto se da porque en promedio el tiempo de espera en parada termina siendo mayor que el óptimo gracias al amplio desvío de tiempos entre servicios que se da cuando se desbalancea una línea.

Para mejorar la confiabilidad y robustez del servicio hay que determinar antes si lo que hay que cuidar es el desvío de los tiempos de llegada de los vehículos con respecto a lo programado (*schedule-based control*) o la variabilidad de las frecuencias en sí. Como ya se mencionó, hay quienes se avocan a uno u otro tema. Esta tesis tomará como problema central el **desbalanceo de una línea de colectivos, manifestada a través de la variabilidad de los tiempos entre arribos de los vehículos a cada parada**. La razón para hacer esto se basa en lo sugerido por Turnquist y Bowman(1980), quienes concluyeron que los itinerarios no tienen relevancia en el caso de circuitos en los que los tramos entre paradas son cortos – de 10 minutos o menos – y la frecuencia es alta. Como el tipo de líneas de colectivo que entrarán en el análisis de este trabajo entran en ésta categoría siempre se analizará la variabilidad de las frecuencias (Ver *Nota al pie n°3*).

Sintéticamente expresado, el problema podría definirse como:

“Analizar y definir la estrategia de control óptima para balancear una línea de colectivos metropolitana, partiendo de ciertas características básicas la línea y modificándola desde su estructura.”

Es un problema complejo, como se explicó en la Introducción, puesto que involucra muchos actores. Por el lado de la empresa proveedora del servicio contamos con colectivos, conductores, inspectores de control y mantenimiento de la flota, entre otros. Éstos se encuentran inmersos en otro sistema, el tránsito, en el cual encontramos otro grupo de actores, como lo son las señales de tránsito, el resto de los vehículos transitando, las disrupciones en el tránsito y los coches de las demás empresas que compiten por el último actor importante: los pasajeros.

Como Abkowitz, Eiger y Engelstein (1986) hallaron, la variación de la frecuencia no crece linealmente a lo largo de un recorrido sino que crece exponencialmente al principio y cuando se forman los pelotones se balancea. Esto comprueba que el problema es complejo, ya que el comportamiento recién descripto es complejo. Esto se remarca porque hace que cobre sentido y se justifique el armado de un modelo de simulación para estudiar en detalle el problema.

III.3 ♦ CUANTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Antes de comenzar a evaluar el impacto de distintas estrategias de control sobre el sistema se consideró importante medir, de alguna manera que ya se verá, la gravedad del problema en distintas situaciones.

La forma de medir la "gravedad del problema" elegida es en función a una variable que se definió en el modelo como "**Km hasta la rotura**". Lo que esta variable indica indirectamente es cada cuántos kilómetros se tendría que instalar un puesto de control en una línea para que ésta no se desbalancee. O visto de otra forma, muestra la longitud máxima que puede tener una línea - cuyo único control se realiza en la terminal – para la cual ésta mantiene una frecuencia estable de servicios. Para ello se determinó que se consideraría rota o desbalanceada una línea cuando el desvío de las frecuencias (más precisamente de los tiempos entre arribos de sucesivos vehículos a una estación) recogidas a lo largo de la corrida superara el minuto. Cuando esto se da, los Km hasta la rotura surgen del producto de la distancia entre paradas y la cantidad de paradas realizadas por el coche que más paradas sirvió – que no es necesariamente el primero en salir si se permite el traspaso entre vehículos.

Asimismo, se dijo que interesa medir la gravedad del problema "en distintas situaciones". Esto quiere decir que se buscó variar ciertos parámetros y ver cómo tal variación afectaba a los Km hasta la rotura. De todos los input del modelo se definieron algunos parámetros a variar. Ellos son los que, según los expertos en transporte público, caracterizan a una línea. Con esto se logra un primer paso muy importante a efectos del trabajo, que es conocer el comportamiento del sistema; para poder luego estimar cuándo una línea cualquiera se va a romper conociendo unas pocas características básicas de ella. Para luego alcanzar el objetivo último que es poder determinar para cualquier línea, en base a esas características, la estrategia óptima de control a aplicar para reducir lo más posible el efecto de apelotonamiento.

En la *Figura III.1* se muestran tales características o parámetros y los valores principales que se le otorgaron a cada una con las unidades correspondientes. Cabe aclarar que se fue variando de un parámetro a la vez, o sea que el estudio se realizó *ceteris paribus* el resto de las variables, las cuales permanecieron en su valor medio.

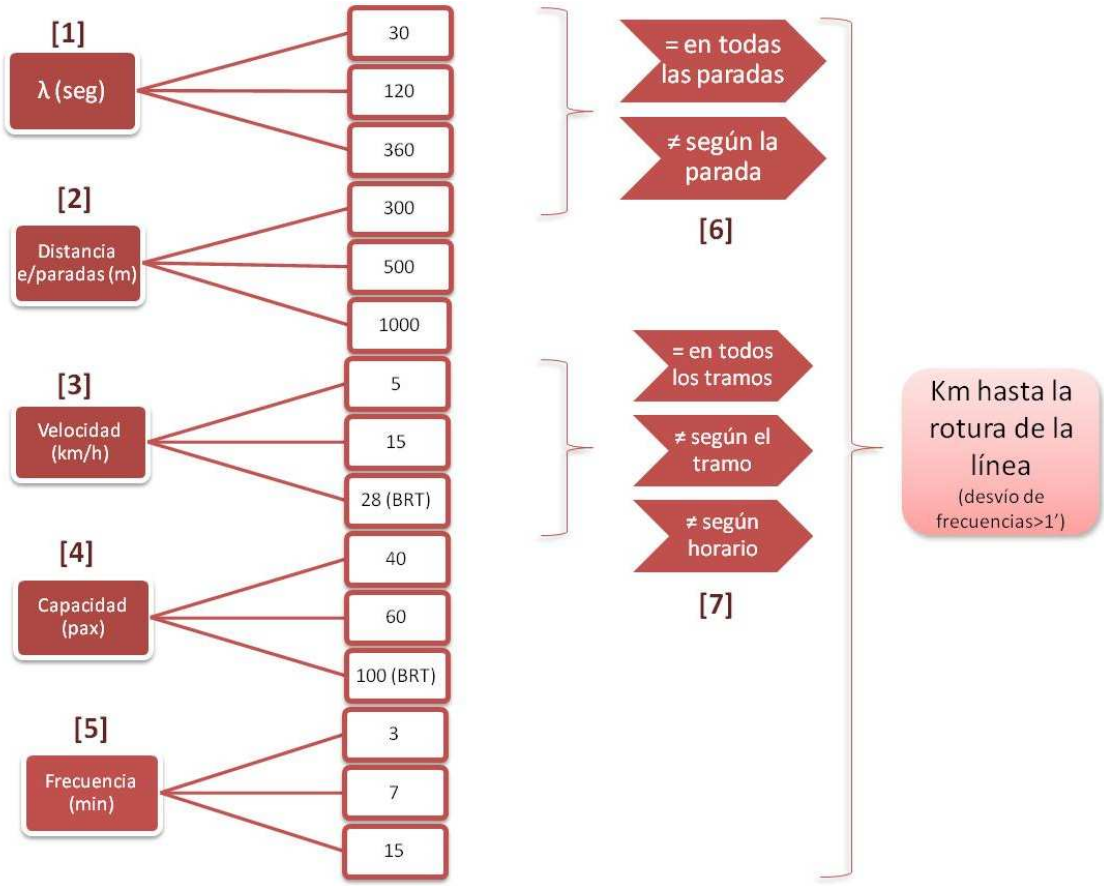

Figura III.1 – Mapa de análisis del sistema

A continuación se explicará cada parámetro mostrado en la *Figura III.1* y cómo se lo varió.

- **λ** es la media de la distribución (Poisson) con la que llegan los pasajeros a cada parada del recorrido. Su valor está en segundos, por la manera en que se definió el *step* del modelo. El valor menor asignado a esta variable es de 30 segundos. Esto quiere decir que en promedio cada 30 segundos llega una persona a la parada, y esto sucede en cada una de las paradas de la ruta. Además el valor medio considerado es de 120 segundos, lo que equivale a 2 minutos, y el mayor es de 360 segundos o 6 minutos. Estos valores no fueron asignados al azar, sino que se obtuvieron de datos otorgados por una empresa de colectivos del mercado. Como se puede imaginar, una línea puede tener un λ de 30 segundos en horas pico y de 360 en los

horarios de menor demanda como la madrugada. Si se toma el valor medio asignado a λ se puede notar que esto equivale a 36 mil pasajeros diarios para una línea de 25 paradas de ida y 25 de vuelta, el cual es un valor razonable dentro de la operación en un día hábil. Por último, se puede ver en la Figura III.1 que además se introdujo otra variación; se hicieron corridas para un escenario en el cual todas las paradas tenían el mismo λ y luego las mismas corridas se realizaron variando el λ según la parada. Esto último quiere decir que ciertas paradas eran más populares (λ/2) con respecto a las paradas normales que tomaban el valor λ.

- Se consideraron **distancias entre paradas** de 300 metros o 3 cuadras, 500 metros o 5 cuadras y 1000 metros o 10 cuadras. Si bien el modelo permite variar la cantidad de paradas de la línea en esta primera parte del análisis se consideraron siempre 20 paradas, ya que en realidad dicho valor no afecta al resultado porque los vehículos no resetean su conteo de paradas hechas cuando terminan la vuelta sino que vuelven a comenzar el recorrido y siguen sumando paradas. Como el output depende de las paradas hechas y no de las vueltas hechas las paradas por vuelta la cantidad de paradas por vuelta es indiferente.
- La **velocidad** promedio de los vehículos se varió de 5 km/h a 28 km/h, siendo ésta última la que se logra en sistemas BRT. Esta variable es de suma importancia ya que junto con la distancia entre paradas definen el **tiempo de marcha** promedio. En el caso de la velocidad se hicieron tres grupos de corridas. Primero se varió la velocidad, pero dicho valor fue el mismo para todos los tramos del recorrido. Luego el valor varió según el tramo, habiendo tramos en los que la velocidad promedio era la mitad de la default. Más tarde, dejando la velocidad en el valor medio, se la varió según el tramo y la hora. Esto quiere decir que por ejemplo a las 7 de la mañana se redujo a la mitad la velocidad de un tramo, simulando que esa es una zona lejana desde la cual la gente sale en ese horario a trabajar al centro; a las 8 se redujo a la mitad la velocidad del tramo siguiente; y a las 9 se redujo de igual manera la velocidad del tramo que representaba la zona céntrica. Por último, se aplicaron las dos últimas variaciones explicadas juntas.
- La **capacidad** o capacidad máxima es la cantidad de pasajeros que puede contener un coche. Si por ejemplo un colectivo llega a una parada con 100% de ocupación, o sea que la cantidad a bordo coincide con la capacidad, y en esa parada se bajan 3 pasajeros sólo podrán subirse 3 pasajeros y el resto tendrá que

esperar al próximo servicio. La capacidad de los colectivos es una de las variables que más le juega en contra a éstos frente a trenes o subtes. Por eso se incluyó en los valores a tomar por esta variable el correspondiente a un bus perteneciente a un sistema BRT, equivalente a 100 pasajeros.

- La frecuencia determina cada cuántos minutos tendría que pasar un vehículo por cada estación. Cuando comienza la corrida el modelo calcula la cantidad de vehículos a circular en la ruta en función a la frecuencia deseada establecida y el tiempo total teórico que lleva dar toda la vuelta. Se podría haber optado por variar la cantidad de colectivos deseados como input y de manera similar calcular la frecuencia resultante para la ruta. El cálculo mencionado estrictamente es:

$$Q = \frac{paradas * l}{vel * f}$$

Donde l es la distancia entre paradas y f la frecuencia. La cantidad de vehículos se redondea al entero más próximo y a partir de este valor puede recalcular la frecuencia teórica despejando f de la fórmula. Esto se hace en el modelo para saber cada cuánto hay que lanzar inicialmente los vehículos desde la terminal.

Se consideró una frecuencia media de 7 minutos, una alta de 3 minutos y una baja de 15 minutos. En realidad estos valores corresponden al período, la inversa de la frecuencia. Por eso se habla de frecuencia alta cuando el valor es el menor de los tres

Ahora se muestran los gráficos que resumen el impacto de cada variación (Ver *Figura III.2*).

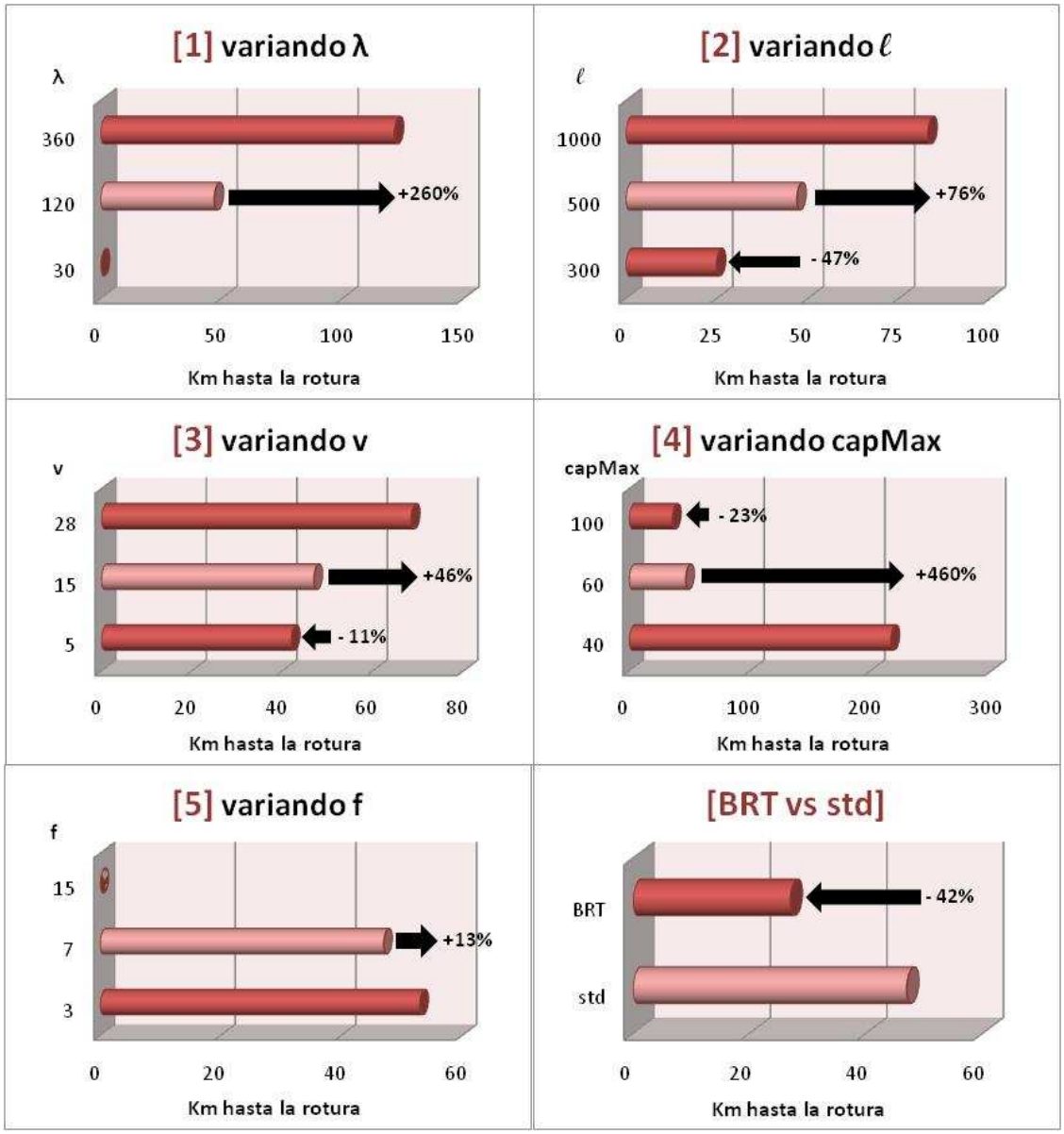

Figura III.2 – Km hasta la rotura en distintos escenarios

Este conjunto de gráficos brinda mucha información sobre el comportamiento de una línea de colectivos. A primera vista se puede decir que una línea dura más sin romperse si:

- λ es mayor
- ℓ es mayor, o sea, las paradas se encuentran más distanciadas entre sí
- la velocidad promedio de marcha es mayor
- la capacidad máxima de los vehículos es menor (hasta el límite de 40, con capacidades menores o iguales a ese valor la línea se satura)
- la frecuencia es mayor, lo que significa que los valores de f sean menores

Se armó también un escenario adicional, que se puede ver en la *Figura III.2* bajo el nombre ”BRT vs. std”. En este caso a cada uno de los parámetros seleccionados para ser variados, mostrados en la Figura III.1, se le dio el valor correspondiente a un sistema de colectivos BRT. Esto se hizo para comparar los Km hasta la rotura entre tal sistema y una línea estándar de colectivos, a la cual se le otorgaron todos los valores medios planteados en la *Figura III.1*. Los valores que tomaron las variables claves en cada caso fueron los siguientes:

- **línea std**: λ=120,l=500,v=15,cap=60,f=7
- **línea BRT**: λ=30,l=500,v=28,cap=100,f=3

Los resultados comprueban la presencia de un sistema complejo ya que si bien el sistema BRT presenta dos factores a favor (mayor v y frecuencia) y dos en contra de la estabilidad de una línea (mayor λ y capacidad), la línea tipo BRT dura un 42% menos que una línea estándar.

Volviendo al resto de los escenarios analizados, cabe aclarar que en varios escenarios la línea se satura. Esto quiere decir que los colectivos se llenan, con lo cual aumentan el número de pasajeros en las colas y los tiempos de espera. Como resultado de la saturación de la línea, el desvío de las frecuencias termina siendo bajo ya que todos los vehículos demoran aproximadamente lo mismo en las paradas. Esa demora termina dependiendo de la cantidad de personas que se bajan de cada vehículo en cada parada, que será igual a la cantidad de personas que suben si el coche está saturado y que no varía mucho por la manera en que se determinó en el modelo la cantidad de paradas que realiza cada pasajero (Ver *IV.2.d*). Debido a la baja variación de las frecuencias, la mayoría de las veces que se satura una línea ésta no se termina de desbalancear a lo largo de un día de operación – que es el tiempo máximo de corrida. En otros casos, se termina desbalanceando la línea pero bastante tarde, pudiendo llevar a conclusiones erradas ya que una línea con los tiempos de espera y la cantidad de gente en cola que acarrea una línea saturada perdería gran parte de sus clientes frente a la competencia[13]. La *Tabla III.1* muestra algunos valores destacados de los escenarios mostrados en la *Figura III.2* en que la línea se satura.

[13] Por una de las simplificaciones que incluye el modelo los pasajeros no se pierden frente a la competencia, sino que se siguen acumulando en cola sea cual fuera el tiempo de espera.

Escenario	dCap (%)	dFrec (seg)	PasajEnCola (por cola)	tEspera (min)	kmHasta Rotura
λ=30,l=500,v=15,cap=60,f=7	0.00	39.54	970.51	484.73	-
λ=120,l=500,v=15,**cap=40**,f=7	3.84	41.52	8.82	17.47	217
λ=120,l=500,v=15,cap=60,**f=15**	0.00	43.90	106.55	212.77	-

Tabla III.1 – Escenarios en que la línea se satura

Como se puede ver, en dos de los casos la línea no se rompe, con lo cual en la *Figura III.2* no se graficaron las barras correspondientes a dichos casos. En estos casos tanto los pasajeros esperando por cola como el tiempo de espera promedio son inconcebibles en un ambiente competitivo. En el caso restante se termina rompiendo la línea pero el resultado indica que la duración se extiende un 460% más que el caso default (λ=120,l=500,v=15,cap=60,f=7), el cual es un valor sin mucho sentido ya que durante todos esos kilómetros de operación el tiempo de espera en cola promedio casi alcanza los 20 minutos. Por último, de la *Tabla III.1* se desprende que en los tres casos el desvío de las capacidades aprovechadas (o porcentaje de ocupación de los coches) tiende a 0% y el desvío de las frecuencias ronda los 40 segundos. Lo primero se debe a que la capacidad aprovechada es casi siempre el 100% ya que los colectivos van siempre llenos.

Siguiendo con el análisis, en [6] se buscó comparar resultados entre situaciones en las que la tasa de arribos a las paradas era la misma para todas las paradas y situaciones en las que esta tasa (λ) variaba según la parada para ver el efecto de dicha variación sobre la estabilidad de la línea. Se observó lo siguiente:

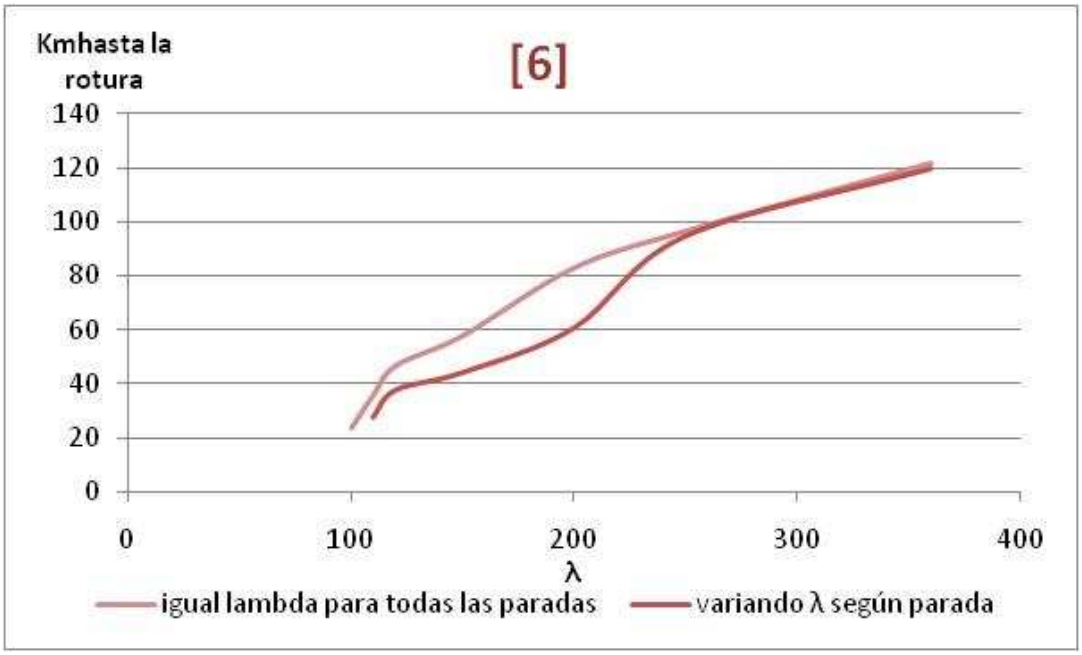

Figura III.3 – Resultados de la variación [6] planteada en la Figura III.1

De la *Figura III.3* se concluye que para λ mayores a 100 la línea se rompe antes si se varía el λ según las paradas, pero esa diferencia en km hasta la rotura con respecto a las corridas en que el λ es igual para todas las paradas se va achicando a medida que se aumenta el λ. Como se puede ver, en este caso se le dieron más valores a λ que los tres planteados en la *Figura III.1*, ya que el comportamiento recién aclarado no se hubiera podido dilucidar si se tomaba únicamente esos tres valores. El primer valor (λ=30 segundos) no aportaba información a este análisis ya que en los dos casos la línea se saturaba. Esto también sucedía para todos los valores de λ menores a 100, por esa razón no se tuvieron en cuenta los Km hasta la rotura resultantes en esos casos y ambas curvas comienzan alrededor de λ=100 segundos.

Ya finalizando con éste análisis, se buscó tener en cuenta otro hecho de la realidad – además del hecho de que las tasas de arribo a las paradas por lo general no son las mismas para todas las paradas de una línea. En [7] se estudió el sistema en el caso de que variara la velocidad de marcha según el tramo; luego en el caso de que variara la velocidad de marcha de toda la línea según la hora; y finalmente en el caso de que ambas condicionas se dieran. La *Figura III.4* muestra los resultados de tales casos.

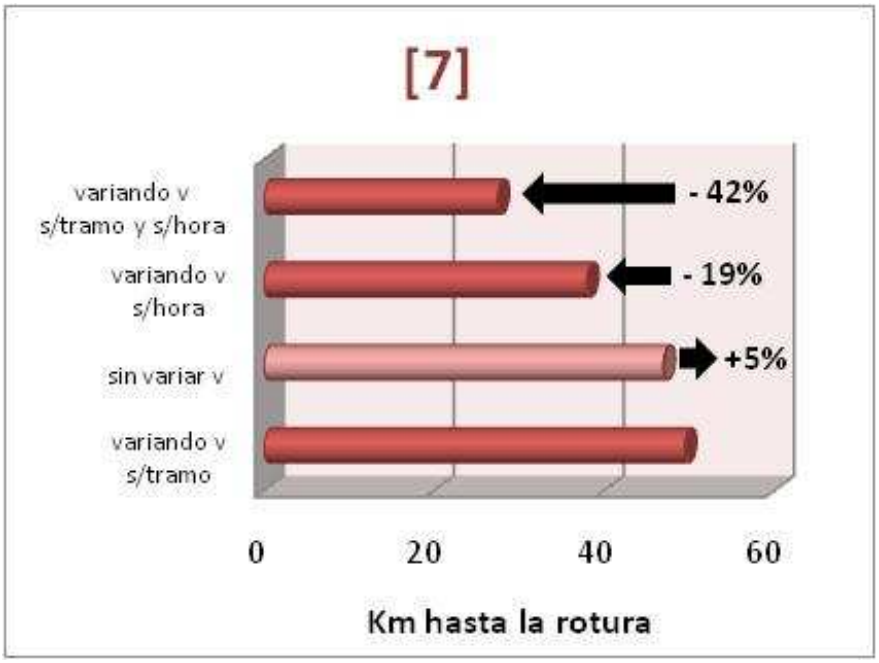

Figura III.4 - Resultados de la variación [7] planteada en la Figura III.1

De forma contra intuitiva, al agregarle variación a la velocidad de marcha según el tramo la línea se vuelve más estable, alcanzando un valor de 49,5 Km hasta la rotura. No sucede lo mismo cuando se varía la velocidad según la hora. En este caso la línea se torna más inestable. Finalmente, cuando se tienen en cuenta ambas variaciones a la vez, la variación de la velocidad según el tramo en vez de jugar a favor de la estabilidad de la línea juega en contra, llegando a reducirse la duración un 42% con respecto al escenario base. (Se vuelve a aclarar que en estos escenarios las variables claves tomaron los valores medios planteados en la *Figura III.1*)

III.3.a - Impacto del problema

En este último apartado de la sección se quiere mostrar uno de los más importantes impactos que tiene el hecho de que una línea de colectivos se desbalancee. Estamos hablando de la pérdida de pasajeros, que significa una reducción en la recaudación de la empresa de transporte público. A través del modelo se demostrará que cuando una línea funciona desbalanceada se pierde un importante porcentaje de sus clientes, viéndose perjudicados no sólo la

empresa sino también los pasajeros que deben recurrir a otros medios de transporte para llegar a destino.

Para ello se armó el modelo de manera tal que las personas en cola, abandonaran ésta cuando su tiempo de espera superara el triple del valor de la frecuencia teórica de la línea ($t_{EsperaMax}$ = 3*f). De esta manera se logró introducir al modelo la competencia existente en el sistema actual de colectivos de la Ciudad de Buenos Aires.

Asignando a los inputs los valores medios de la *Figura III.1* y simulando la operación de un día completo (86.400 segundos o *steps*) se pudo notar que la pérdida de pasajeros equivale a un **25%** del total de pasajeros que se recogen cuando la misma línea funciona balanceada. Para conseguir que la línea funcionara balanceada, se desligó la demora en parada de la cantidad de pasajeros que suben/bajan en ésta del vehículo en cuestión. Por ende, se eliminó una de las causas principales del problema, la distribución de llegada de pasajeros a las paradas, que es la única tenida en cuenta en el modelo (Ver *IV.2.d*). Lo que se hizo fue asignar una demora fija en cada parada equivalente a

$$t(seg) = \frac{f}{\lambda} \times 2$$

de manera que el tiempo demorado se correspondiera con esos parámetros del modelo y no se alejara de la realidad, pero que este tiempo no limitara la cantidad de pasajeros a subir al coche. A continuación se muestran los valores de tres de los indicadores principales para cada corrida.

	Línea std.	Línea balanceada
paxTotales	10593	**14067**
paxPerdidos	3533	59
tEsperaProm (min)	7.33	3.67
dFrec (seg)	310.03	3.93
dCap (%)	21.73	6.37

Tabla III.2 – Comparación de resultados entre línea balanceada y desbalanceada

Como se puede ver en la *Tabla III.2*, el problema a tratar en esta tesis no sólo genera una disminución de la recaudación para la empresa sino que también se ven afectados los pasajeros por tener que enfrentar mayores tiempos de espera en cola (el doble) y viajar más incómodos (por haber un mayor dCap%, lo que significa una peor distribución de los pasajeros entre la flota).

< IV > SOLUCIÓN PROPUESTA

IV.1 ♦ UNA SOLUCIÓN INTEGRADORA

El eje de esta tesis es entonces la búsqueda de la estrategia de control que mejor logre mantener igualmente espaciados en el tiempo a los vehículos del TPAU en cada situación que se plantee para así garantizar un mejor servicio para el usuario, con el recupero de clientes por parte del TPAU como último objetivo para mejorar la calidad de vida de todos los ciudadanos.

Para ello se armó un modelo híbrido, que conjuga la simulación por agentes y la discreta (Ver *IV.2.a*) como plataforma para estudiar la reacción del sistema frente a distintas estrategias de control incorporadas a él. La idea es poder contar con viejas, nuevas y variadas soluciones al problema planteadas por algunos autores, todas en un solo modelo para obtener una comparación completa para distintos escenarios.

A su vez, este trabajo tomará provecho de la situación actual en la cual el gap entre lo analítico y la toma de decisiones aplicada se ha achicado dramáticamente gracias a los avances tecnológicos que permiten una recaudación efectiva de una gran cantidad información sobre la marcha y un grado de comunicación con los vehículos nunca antes visto. La empresa de transporte colaboradora en este trabajo ha instalado recientemente un sistema de GPS en toda su flota, lo cual genera un contexto ideal para el estudio en cuestión por la información que el sistema provee y para la implementación de las técnicas de control que surjan del estudio.

Con respecto a las principales ventajas de esta manera de abordar el problema, la modelización del sistema del modo descripto constituye una alternativa económica para la evaluación de la calidad del servicio y una herramienta eficaz de apoyo en la toma de decisiones respecto a la viabilidad de posibles cambios. Hoy en día, en cualquiera de las empresas poseedoras de líneas de colectivos cualquier cambio que pueda afectar la calidad del servicio, por ejemplo los cambios en la diagramación de itinerarios, se testea directamente en campo, mientras que en muchas otras industrias esta manera de proceder ya se ha desterrado por completo. Por ejemplo, cualquier cambio en la programación de la producción o en el diseño de un producto o envase se modeliza primero y luego se lleva a la práctica. Este trabajo busca llevar esa tendencia a la industria del transporte público.

Estudios viejos siempre trataron de armar modelos simples de forma tal de no requerir muchos datos de campo. Por esta razón siempre se planteaba una función objetivo, por ejemplo minimizar los tiempos de espera en cola, la cual terminaba limitando las decisiones a un par de factores. Esto no será necesario en el modelo que se describirá a continuación. En éste se podrán observar a la vez varios indicadores de la performance de la línea para cada estrategia que se pruebe.

IV.2 ♦ DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

IV.2.a – El tipo de modelo

Como ya se mencionó en varias ocasiones, el modelo es híbrido. Esto quiere decir que combina varios tipos de simulación, en este caso dos: la simulación discreta y la simulación por agentes. A continuación se dará una breve introducción a cada una y en la próxima sección se verá el por qué de esta combinación en este caso.

SIMULACIÓN POR AGENTES

En la simulación por agentes existen entidades que tienen una estructura de comportamiento (reglas, parámetros y procesos) individual definida y relativamente simple. Sin embargo, al relacionarse las entidades entre sí y con el entorno generan un comportamiento emergente complejo.

Dentro de la simulación por agentes se encuentra el campo de autómatas celulares. Un autómata celular (A.C.) es un modelo matemático para un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos. Es adecuado para modelar sistemas naturales que puedan ser descritos como una colección masiva de objetos simples que interactúen localmente unos con otros. Un ejemplo de este tipo de simulación es el de "*Flocks of Boids*" desarrollado por Craig Reynolds en el cual varias manadas de aves se atacan entre sí. La simulación entera pende de muy pocas reglas simples - que incluyen separación, alineamiento y cohesión - pero su evolución es extraordinaria e impredecible.

La gran ventaja que tiene la simulación por agentes es que se estipulan estructuras individuales de los agentes para generar un comportamiento global. La mayor desventaja es la necesidad de procesar mucha información en paralelo. Sin embargo, los avances tecnológicos han permitido atacar este problema logrando que la simulación por agentes cobre cada vez más importancia. Su aplicación en estudios sociales ha sido el mayor foco, pero recientemente ha despertado el interés del sector empresarial B2C (*Business to Consumer*).

SIMULACIÓN DISCRETA

La simulación discreta o por eventos discretos es una técnica informática de modelado dinámico de sistemas. Frente a su homóloga, la simulación de tiempo continuo[14], ésta se caracteriza por un control en la variable del tiempo que permite avanzar a éste a intervalos variables, en función de la planificación de ocurrencia de tales eventos a un tiempo futuro. Un requisito para aplicar esta técnica es que las variables que definen el sistema no cambien su comportamiento durante el intervalo simulado.

Estos sistemas se caracterizan por mantener un estado interno global del sistema, que puede no obstante estar física o lógicamente distribuido, y que cambia parcialmente debido a la ocurrencia de un evento. El estado del sistema sólo cambia mediante la ejecución de eventos y uno o varios procesos dedicados a su ejecución avanzan el tiempo de simulación a medida que se van ejecutando y eliminando los eventos pendientes para el valor de tiempo actual. La ejecución de un evento puede desencadenar la generación de nuevos eventos futuros. Cada uno está marcado por su tiempo, por lo que el orden de generación puede no coincidir con el orden de ejecución.

Dentro de un modelo de simulación discreta es común encontrar eventos, procesos, entidades y recursos. Los **eventos** son sucesos que hacen cambiar las variables de estado del sistema. Los **procesos** o **actividades** son secuencias de eventos pertenecientes a una entidad que cierran un ciclo funcional. A diferencia de un evento, que se ejecuta a tiempo de simulación constante, un proceso se desarrolla dentro de un intervalo de tiempo de simulación no puntual. Los procesos incluyen demoras, colas y servicios, entre otros. Las **entidades** son actores que representan en su agregado al sistema compuesto, son componentes que recorren el sistema y se diferencian mediante atributos o propiedades. En el caso a tratar un tipo de entidad son los choferes, por ejemplo. Por último, los **recursos** son entidades o elementos permanentes del modelo, que proveen servicio a otras entidades. Sus estados son: disponible u ocupado.

Dentro de la amplia gama de áreas de aplicación de la simulación discreta se pueden mencionar: manufactura, operaciones, ingeniería, diseño, logística y telecomunicaciones. Este tipo de simulación tiene muchos más años de historia que la simulación por agentes y sigue siendo la más conocida y utilizada.

[14] La simulación continua constituye el tercer tipo de simulación conocida, que no se explicará en detalle en este trabajo por su falta de relación con él.

IV.2.b – Diagrama estructural y descripción del modelo

A grandes rasgos, el modelo está compuesto por **paradas**, que pueden ser replicadas la cantidad de veces que se desee y tienen una estructura común. Como se puede ver, ésta es la parte del modelo en la que entra en juego la simulación **por agentes**. La *Figura IV.1* muestra cómo está compuesta una parada.

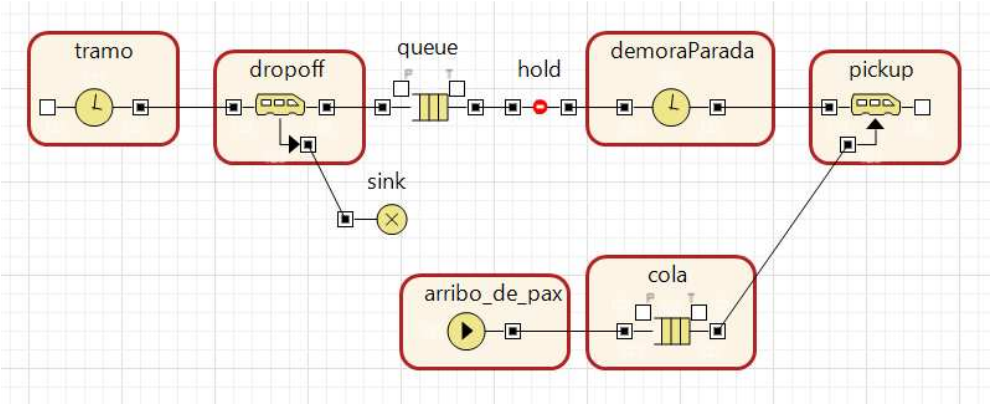

Figura IV.1 – Composición de una parada en el modelo

Los componentes básicos son[15]:

- un **tramo**, que es el recorrido que deben hacer los vehículos entre la parada anterior y la mostrada
- un **dropoff**, que simula el descenso de los pasajeros que arribaron a su destino
- una **demora en la parada**, la cual se debe al ascenso y descenso de pasajeros, y en el caso de que se aplique alguna estrategia de *Holding* también se deberá a ello
- un **pickup**, que simula el ascenso de los pasajeros al vehículo en esa parada
- un **arribo de pasajeros**, que es el generador de pasajeros con cierta tasa, ya conocida como λ
- una **cola**, en donde se acumulan los pasajeros que arribaron hasta que suben a los coches

Cada parada está a su vez conectada con su predecesora y su sucesora. De esta manera el recorrido es circular, ya que la última parada conecta con la primera y se vuelve a comenzar el recorrido.

Al crear las paradas como agentes se puede variar la cantidad de paradas de la ruta fácilmente a través de un parámetro (Ver *Figura IV.5*) sin

[15] Los dos componentes que se ven en la figura y no son explicados en detalle sirven para que sólo un coche pueda ocupar la parada a la vez.

necesidad de agregar y configurar los módulos recién mencionados de a uno a la vez.

Pasando a la parte **discreta** del modelo, en él hay dos tipos de entidades: los vehículos y los pasajeros.

Los **vehículos** son despachados desde la terminal al comienzo de la corrida con la frecuencia teórica elegida y desde ese momento en adelante circulan por la línea recogiendo y dejando pasajeros en las paradas. Cuando llegan a la última parada del recorrido retoman la primera, como ya se explicó. Algunas de las características más importantes de los vehículos, que pueden ser variadas también, son su capacidad para contener pasajeros (*capMax*); la frecuencia con la que pasan, que va de la mano de la cantidad de vehículos que se hace circular por la línea; y la velocidad de marcha.

Los **pasajeros** son el segundo tipo de entidades que contiene el modelo. A cada parada llegan pasajeros según una distribución *Poisson* con media λ, el cual es uno de los parámetros claves del modelo que tienen que ver con los pasajeros. Cuando arriban a la parada, a cada pasajero se le determina la cantidad de paradas a realizar en colectivo. Los pasajeros luego esperan en cola hasta poder subir a un vehículo, en el cual viajan hasta su destino final, determinado por la cantidad de paradas a realizar y su parada de origen.

Cabe aclarar que en el modelo los vehículos contienen a los pasajeros y viajan de parada en parada. Los pasajeros no pueden contener vehículos ni viajar de parada en parada, salvo que estén dentro de un vehículo.

En el modelo se simula la operación de una sola línea durante un día. Pero a partir de la variación de los input del modelo se pueden cambiar tanto la línea (a través de sus características básicas) como la duración de la simulación.

El modelo considera un período de **warm up** o precalentamiento. Durante ese período no se relevan datos, para comenzar a ser relevados éstos una vez que todas las variables entraron en régimen permanente. Un claro ejemplo de esto se puede ver con las colas en las paradas. Durante la primer vuelta el colectivo que se lanza primero debe enfrentarse con colas mucho más largas en las últimas paradas del recorrido ya que se estuvieron acumulando pasajeros allí desde el comienzo de la corrida hasta el momento en que dicho coche llega a la parada. Este es un tiempo mucho mayor que el tiempo entre arribos consecutivos para cualquier línea.

IV.2.c – Codificación del modelo

Se debió traducir a un programa específico todo lo desarrollado en el apartado anterior, incorporando todas las restricciones y parámetros necesarios para imitar el sistema correctamente. Esta tarea habitualmente se conoce como **codificación**.

El modelo fue codificado en el software de simulación **AnyLogic** (de *XJ Technologies*), que trabaja basado en el lenguaje de programación Java. La principal ventaja que ofrece respecto de otros paquetes es su versatilidad a la hora de simular. Por ejemplo, es actualmente el único programa que permite combinar y anidar los tres enfoques de simulación ya vistos en modelos de alta complejidad. En cuanto a la simulación discreta, este software permite una enorme libertad a la hora de programar restricciones particulares, algo interesante para lograr profundidad en el estudio del caso y representar la realidad de la manera más adecuada posible.

Una ventaja adicional que permitió el mencionado software fue la posibilidad de interactuar con archivos de Excel, tomando los datos necesarios y devolviendo los resultados obtenidos en el formato de planilla de cálculo más ampliamente usado. De esta manera, se agilizó enormemente la interacción entre las corridas del modelo y la comparación de indicadores.

Por último, AnyLogic permite el armado de una interfase amigable y la animación del modelo. De esta manera la simulación se hace más entendible y más fácil de manejar para otros usuarios aparte del que la codifica.

IV.2.d – Definición de inputs y outputs del modelo

Muy a vista gorda a partir de ciertos inputs, condiciones y constantes el modelo realiza una serie de operaciones y devuelve lo que llamamos outputs, que pueden ser simples indicadores o curvas completas. Esto aparece resumido en la *Figura IV.2*.

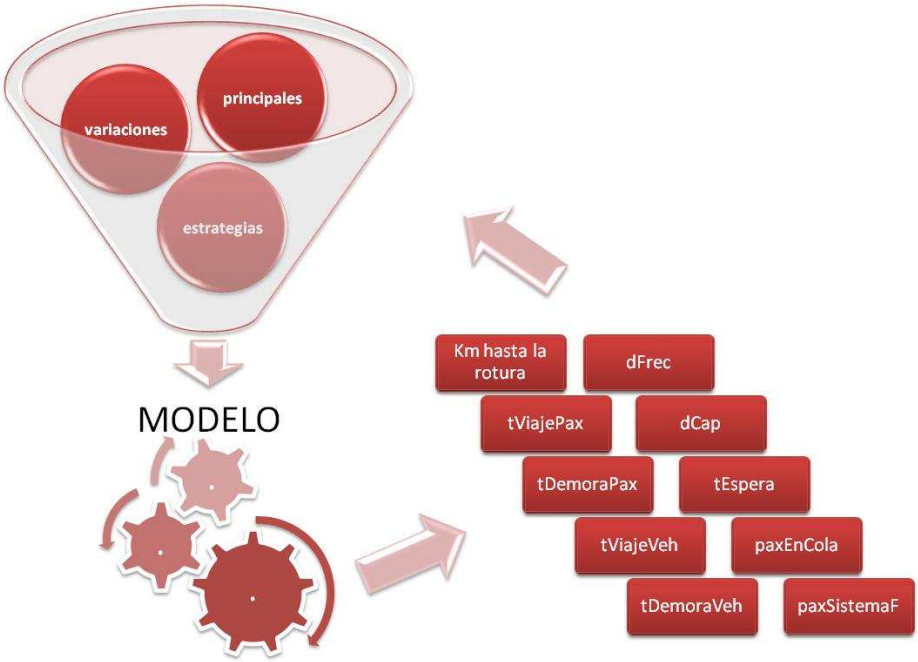

Figura IV.2 – Inputs y outputs del modelo

Como se puede ver en la figura, dentro de los inputs del modelo se pueden distinguir tres grupos distintos en base a su funcionalidad. Al primer grupo se lo llamó “inputs-principales”. En él se incluyen todos los parámetros propios de una línea; que pueden tener que ver con los clientes de la línea, la flota o el diseño de ésta. El segundo grupo fue denominado “inputs-variaciones” porque están permiten activar o desactivar ciertas variaciones que fueron cargadas al modelo. Por ello son todas variables *booleanas* (*true/false*). Por ejemplo, el modelo puede funcionar como si la línea fuera de subte/tren o de colectivo. Las grandes diferencias entre ambas formas se encuentran en:

- las demoras por pasajero en subtes/trenes son menores por contar con plataformas exclusivas en las estaciones
- la posibilidad de traspaso de los colectivos entre sí

El tercer y último grupo de inputs, “inputs-estrategias”, incluye a todos los inputs necesarios para ejecutar una u otra estrategia en el modelo. Son parámetros y constantes necesarias dentro de la lógica de las estrategias. Algunos se usan para más de una estrategia y otros no. La *Tabla IV.1* describe en detalle cada uno de los parámetros o grupos de parámetros que conforman el total de inputs del modelo.

inputs-principales	
λ (seg)	media de la distribución Poisson, distribución de los arribos de ppasajeros a las paradas
paradas	cantidad de paradas de la línea o recorrido
capMax	cantidad de pasajeros máxima que puede contener un vehículo de la línea
velocidad (m/seg)	velocidad de marcha promedio de los vehículos
frecuencia	frecuencia teórica de la línea, que puede cambiar a lo largo de la corrida debido a demoras
vehículos	cantidad de vehículos a circular simultáneamente a lo largo de la línea
distancia e/paradas	promedio de metros entre paradas
duración de corrida	segundos totales a simular
inputs-variaciones	
tipo colectivo	decide si se simula una línea de TPAU o sobre rieles
variarVelSegunHora	varía o no la velocidad de todos los vehículos en todos los tramos por igual en función a la hora del día
variarVel SegunTramo	varía o no la velocidad de todos los vehículos al recorrer ciertos tramos de la ruta
variarLambdaSegunParada	varía o no las tasas de arribo a las paradas en función al número de parada
variarLambdaSegunHora	varía o no las tasas de arribo de todas las paradas por igual en función al horario
usaLimiteDP	frena o no la simulación cuando el desvío de las frecuencias supera los 60 seg
inputs-estrategias	
parámetros	algunos parámetros necesarios para ciertas estrategias;tmin/max,alphamin/max,costomin/max,umbralmin/max,etc
frecuencias de actualización	definen cada cuánto se recalculan las variables intervinientes en algunas estrategias

Tabla IV.1 – Inputs del modelo[16]

Vale aclarar que los inputs frecuencia y cantidad de vehículos están relacionados según la ecuación mostrada en la sección *III.3*, por lo cual no tiene sentido asignarle un valor a ambos al inicio de la corrida. Se deja la

[16] Cuando se varía lambda según la parada se le adjudica a un cuarto del total de las paradas, elegidas aleatoriamente, un lambda equivalente a la mitad del resto de las paradas.

Cuando se varía la velocidad de marcha por tramo se le adjudica una velocidad equivalente a la mitad de la normal a un cuarto del total de los tramos del recorrido, también elegidos al azar.

posibilidad de variar cualquiera de los dos para que el otro se acomode en función al determinado por el usuario.

En cuanto a los outputs del modelo, a la hora de definirlos se tuvo en cuenta la opinión de los expertos en transporte público. Se buscó que con unos pocos outputs no se dejara de tener en cuenta ni la satisfacción de los clientes ni la rentabilidad de las empresas proveedoras del servicio. Al mismo tiempo, se intentó coincidir en varios indicadores y gráficos con lo realizado por los autores del paper tomado como referencia para verificar y validar el modelo (Ver *IV.2.e*). Todos fueron ya mostrados en la *Figura IV.2* y serán descriptos a continuación más en detalle.

outputs	
Km hasta la rotura	distancia recorrida en Km por el vehículo que más paradas sirvió hasta el momento en que el desvío de las frecuencias superó el minuto
dFrec (seg)	desvío (σ) de los tiempos entre arribos sucesivos de vehículos a una parada, el modelo lo arroja en segundos
dCap (%)	desvío (σ) de la ocupación porcentual de los vehículos, que se mide en cada parada
tEspera (seg)	tiempo de espera en cola promedio de los pasajeros, el modelo lo arroja en segundos pero también será mostrado en minutos en ciertas ocasiones
paxEnCola (pax/parada)	cantidad de pasajeros promedio en cola por parada
paxSistemaF	cantidad de pasajeros en todo el sistema (en los coches y en cola) al finalizar la corrida
tViajePax (seg)	tiempo de viaje promedio dentro del vehículo y en movimiento para los pasajeros
tDemoraPax (seg)	tiempo de demora para los pasajeros, debido a espera en cola o en el coche
tViajeVeh (seg)	diferencia entre el tiempo total que tarda un coche en dar la vuelta completa y el tiempo de demora
tDemoraVeh (seg)	tiempo de demora promedio de los vehículos; puede deberse a estrategias de Holding,subida y bajada de pasajeros o disrupciones en la línea

Tabla IV.2 – Outputs del modelo

Mientras que los **Km hasta la rotura** fueron utilizados como principal indicador en la sección *III.3* cuando **usaLimiteDP** sea falsa el **dFrec** promedio de la corrida y el valor final de dFrec lo remplazarán.

Los valores promedio o finales, según corresponda, de los outputs explicados hasta ahora son todos exportados a una planilla Excel cada vez que finaliza una corrida. Pero éstos no son la única manera de arrojar resultados que tiene el modelo ya que al mismo tiempo las distribuciones y/o evoluciones de algunas de estas variables son mostradas por miedo de gráficos durante toda la corrida en la interfase del modelo. En la sección correspondiente se mostrará en profundidad lo que se acaba de mencionar.

IV.2.d – Supuestos y restricciones del modelo

En esta sección se tratarán primero los temas más generales del modelo para ir luego adentrándonos en los más particulares.

Como ya se mencionó una de las principales restricciones o límites del modelo consiste en que solamente modela una línea a la vez, no da la posibilidad de estudiar toda una red al mismo tiempo ni la interacción de dicha línea con otros medios de transporte. A su vez, la simulación se limitó a la operación diaria, debido a que el *step* en el modelo equivale a un segundo por la necesidad de estudiar las demoras en paradas – que son del orden de los segundos – y de prolongarse la duración de la corrida el programa requeriría mucha memoria. Otra restricción importante tiene que ver con que no se tuvieron en cuenta a los choferes de la línea, que podrían haber sido otro tipo de entidad en el modelo. Se tomó esta decisión por no tener que ver con el eje de la tesis, sabiendo que sin mucha complicación se podría agregar más adelante a los choferes como entidad adicional. Al mismo tiempo, el tráfico sólo se tiene en cuenta a través de los distintos tiempos de marcha según horario y tramo; y las señales de tránsito no son tenidas en cuenta, motivo por el cual no se estudiarán estrategias del tipo *Signal priority*.

Una de las limitaciones que más importa a efectos del estudio es que de todos los causantes de inestabilidad de la frecuencia de una línea que se explicaron sólo se tendrá en cuenta en el modelo **la propia distribución de llegadas de pasajeros a las paradas**. Dentro de las causas endógenas, se justifica más el estudio de ésta por no ser remota e impredecible como otras y sí una causa constante, de las más relevantes y medianamente fácil de parametrizar y estudiar. Obviamente no tiene mucho sentido enfocarse en las causas exógenas por no estar bajo el control de la empresa de colectivos.

A continuación se enumerarán otras restricciones y supuestos del modelo de carácter más específico:

- Las demoras por desaceleración y aceleración en las paradas están incluidas en tiempos de marcha promedio.

- Distribución Poisson para la llegada de pasajeros a las colas, lo cual deja de lado a paradas con distribuciones especiales de tiempos entre arribos como por ejemplo paradas cercanas a hospitales, universidades, estaciones de trenes o subtes, etc.
- Si el coche tiene una ocupación del 100% no se le permite a los pasajeros en cola subirse, deben esperar al próximo interno.
- Hay una demora extra (incremento del 50% del tiempo) por subida/bajada de pasajeros cuando el coche tiene una ocupación mayor al 90% por los impedimentos en la movilidad dentro del vehículo que esto genera.
- La cantidad de paradas que un pasajero realiza se establecen según una distribución uniforme discreta cuyos valores mínimos y máximos son 1 y la cantidad de paradas de la ruta respectivamente.
- La distancia entre paradas es homogénea.
- La capacidad de contención de las paradas es infinita.
- El período de warm up dura 2 vueltas enteras, lo que quiere decir que el período de precalentamiento finaliza cuando el primer vehículo lanzado comienza su tercera vuelta, equivalente a haber servido 40 paradas (2 vueltas de 20 paradas cada una).
- El cálculo de la demora en parada debido a subida y bajada de pasajeros en el caso de no aplicarse ninguna estrategia de control es:
    - tipo Colectivo => 2 segundos por cada pasajero y toma el máximo entre la cantidad de pasajeros que suben y los que bajan en la parada
    - tipo subte/tren => 1 segundo por cada pasajero que sube o baja, suma la cantidad de pasajeros que suben y bajan ya que en este tipo de transporte no hay puertas separadas para el ascenso y descenso.

IV.2.e – Validación del modelo

Para poder verificar el comportamiento del sistema y más adelante validarlo numéricamente se comenzó su construcción partiendo de un modelo realizado por Gershenson y Pineda [11]. Éste fue codificado usando NetLogo[17] y simula una línea de trenes, pero tiene en cuenta sólo un vagón por tren. En la simulación tanto el tiempo como el espacio son discretos, y las unidades para cada uno son **ticks** y ℓ (longitud de un vagón, que representa un tren entero).

[17] hppt://ccl.northwestern.edu/netlogo

La corrida tiene una duración de 10.000 ticks, salvo que se alcance un máximo de 3.000 pasajeros en el sistema.

Si bien el modelo da la posibilidad de variar ciertos parámetros como la cantidad de estaciones o vehículos, entre otros, gran parte del estudio del impacto de estrategias se realizó en base a los siguientes inputs y valores:

Variable	Descripción	Valor
S	cantidad de estaciones	5
V	cantidad de vehículos	5,[2,8]
d_s	distancia entre estaciones	24ℓ
λ	tasa promedio de flujo de pasajeros	[3,15]
C_v	capacidad de los vehículos	50 pax
C_s	capacidad de las estaciones	infinita
d_{vmin}	distancia de separación mínima e/vehículos	1ℓ
	velocidad crucero de vehículos	1ℓ/tick
	aceleración de vehículos	±1ℓ/tick^2

Tabla IV.3 – Parámetros y valores usados en el modelo de Gershenson y Pineda

En el modelo de Gershenson y Pineda el comienzo de cada corrida cada vehículo arranca en una parada, ya que hay 5 vehículos y 5 paradas, y las colas se encuentran vacías. De la misma forma se configuró el modelo de este trabajo en un principio, siguiendo con la idea de usar el modelo de ellos para verificar y validar éste. Más adelante surgió la necesidad de variar la frecuencia teórica de los servicios, y por lo tanto la cantidad de vehículos funcionando simultáneamente en la línea, y se terminó lanzando de a uno a los coches desde el principio de la corrida según la frecuencia teórica – como ya se explicó en *IV.2.b*. Afortunadamente, con ambas estructuras el modelo pudo ser validado contrastándolo con el de Gershenson y Pineda.

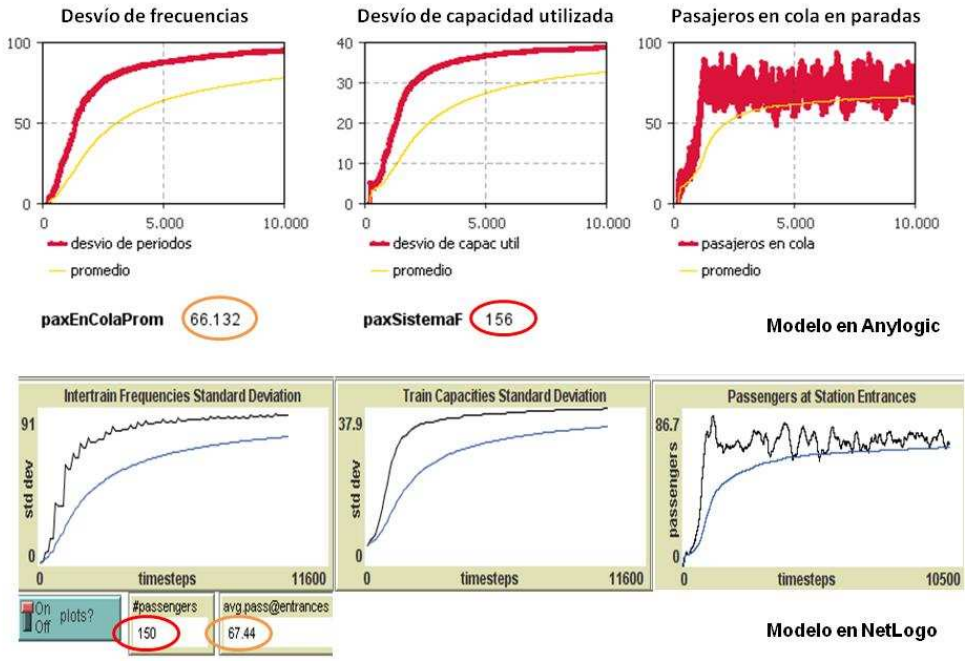

Figura IV.3 – Validación del modelo

Como se puede ver en la *Figura IV.3*, el modelo de AnyLogic logra imitar el comportamiento del sistema obtenido por Gershenson y Pineda, y los valores que se alcanzan son muy aproximados a los mostrados por ellos. En este caso los valores de los parámetros principales fueron: λ=9 ticks, paradas=5, vehículos=5, distancia e/paradas=24ℓ, vel=1ℓ/tick, capMax=50, tcorrida=10.000 ticks (y para el modelo en AnyLogic los valores fueron los mismos expresados en unidades equivalentes). Si bien las interfases de ambos modelos incluyen más gráficos, se optó por mostrar los tres más importantes para simplificar y no abrumar con datos. Los gráficos de la izquierda muestran la evolución del desvío de los períodos o tiempos entre arribos consecutivos de vehículos, junto con la evolución del promedio de dicha variable. Los gráficos del medio hacen lo mismo, pero para el desvío de la ocupación porcentual de los coches. A la derecha están graficados los pasajeros esperando en cola a lo largo de toda la ruta, y también su promedio. Al mismo tiempo, se puede notar en la figura la proximidad entre los valores de pasajeros finales en el sistema y el promedio de pasajeros en cola al comparar los dos modelos.

Como si esto no fuera suficiente, al modelo se le agregaron luego algunas de las estrategias aplicadas por esos autores; la estrategia del tiempo mínimo (*The mínimum method*), la estrategia mixta según nuestro modelo (*The máximum method*), y ambas estrategias en sus versiones adaptativas (*Adaptive methods*). A continuación se muestra la validación de dos de los escenarios en los que se aplicaron estas estrategias. En la parte superior de la Figura IV.4 se muestran los resultados obtenidos gracias a la aplicación de la estrategia del mínimo, de 10 segundos o tics en este caso. En la parte inferior se muestra la estrategia mixta (*The min-max method*) en donde se estableció

para ambos modelos un tiempo mínimo de permanencia en las paradas de 15 segundos y un tiempo máximo de 20 segundos. No se entrará en detalle ahora sobre la significancia de los resultados en cada caso, si bien una estrategia se muestra mucho más efectiva que la otra, porque eso se verá en la Sección *V.* Lo que vale recalcar ahora es la similitud entre los resultados de ambos modelos. A pesar de haber algunas diferencias leves si uno se basa en los valores medios alcanzados y las evoluciones mostradas la elección entre una u otra estrategia mirando cualquiera de los dos modelos sería definitivamente la misma.

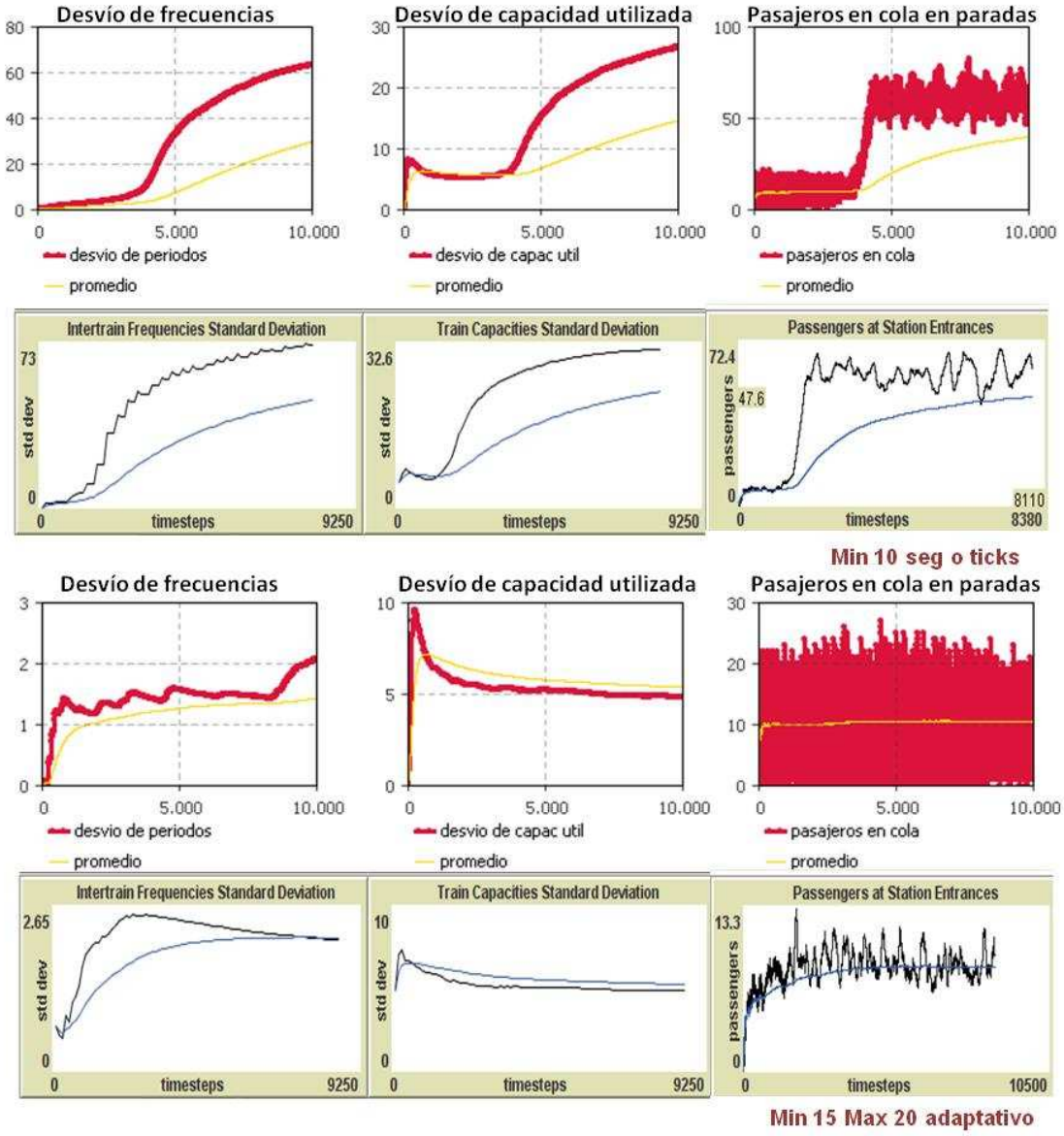

Figura IV.4 – Validación del modelo aplicando estrategias de control

Como se puede ver y ya se hizo mención muchos de los gráficos y outputs del modelo fueron también tomados del modelo de Gershenson y Pineda. Esto se hizo por dos razones; la primera, facilitar la validación del

modelo; y la segunda, aprovechar el conocimiento sobre el tema de estos autores.

Ya concluyendo esta sección vale la pena resaltar que si bien al modelo se le fueron agregando lógicas extras y variaciones, éste logró siempre copiar los resultados del modelo de Gershenson y Pineda al volver al escenario base base[18].

IV.3 ♦ DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

Esta sección pretende introducir y explicar claramente cada una de las estrategias de control de mantenimiento de la frecuencia para una línea que se aplicaron al modelo.

Se puede considerar que todas las estrategias que se aplicaron son variantes de la estrategia de *Holding*. En realidad no todas caerían estrictamente en esta categoría, ya que algunas en vez de mantener más tiempo del necesario a los coches en las estaciones los obligan a retirarse antes de tiempo de éstas. Se podría crear una nueva categoría para este tipo de estrategias, ya que tampoco caen dentro del resto de las estrategias mostradas en la *Figura II.2*. Para simplificar se dirá que son todas estrategias de Holding porque en base a ciertos criterios, que varían según la estrategia, se determina cuánto tiempo va a estar detenido cada coche en la parada.

Una vez aclarado esto, vale aclarar por qué no se incluyeron en el modelo los otros tipos de estrategias ya explicados. Las estrategias de *Stop skipping*, *Expressing*, *Deadheading* y *Short-turning* se dejaron de lado por no estar preparadas las paradas ni el sistema de boletos actuales de los colectivos para minimizar los inconvenientes que la implementación de tales estrategias traería a los usuarios. Por último, la estrategia de *Signal priority* no se tuvo en cuenta por dos razones principales. La primera es que para poder ver en detalle los efectos de tal estrategia en el modelo, éste se tendría que haber planteado de otra manera. Ya que de la forma en que se planteó no se ve la interacción de la línea de colectivos con el resto del tránsito y no tiene sentido estudiar la estrategia si no se pueden ver las consecuencias negativas que ésta puede llegar a tener en el sistema entero. La segunda razón está basada en que para poder implementar estrategias de prioridad para el transporte público en las señales se depende enormemente del gobierno; y si bien éste se ha involucrado en el tema de manera favorable durante los últimos años falta un

[18] Se llama “escenario base base” al que imita el escenario base del trabajo de Gershenson y Pineda. El “escenario base” surge de asignarle a todos los inputs los valores medios vistos en la *Figura III.1* y correr el modelo *tipo colectivo*.

largo trecho hasta alcanzar el nivel de estructura necesario para aplicar una estrategia así.

Por todo esto, resultó preferible enfocarse en estrategias que puedan ponerse en marcha cuanto antes si los resultados las demuestran eficaces. Sobre todo se tuvo en cuenta la disponibilidad de GPS en cada coche de la flota de la empresa colaboradora, a la hora de plantear estrategias de *Holding* propias y propuestas por otros autores.

IV.3.a – Estrategia del tiempo mínimo

Por medio de esta estrategia se establece un tiempo mínimo que los coches deben cumplir en las paradas. De tal modo, por más que no haya más pasajeros para bajar o subir los coches deben quedarse como mínimo el tiempo establecido. Esta estrategia busca atacar el problema de los colectivos que van más rápido que lo esperado por servir paradas con poca gente acumulada. Es un típico caso de una estrategia de Holding basada en un valor umbral (*Threshold-based Holding Strategy)*. El objetivo de este método es no permitir que los coches en tales condiciones alcancen a los coches más lentos. La lógica detrás de esto es muy simple y se muestra a continuación:

```
if(tiempo<get_Main().tmin)
     {tiempo=get_Main().tmin;
};
```

Así cada vez que un coche llega a una parada se calcula el tiempo que debería permanecer en ésta en función a los pasajeros que quieren descender y los que hay esperando a subir en la parada, según los criterios explicados en la última viñeta de la sección *IV.2.d*. Si ese “tiempo” es menor al umbral establecido (tmin), entonces se lo corrige haciendo al vehículo permanecer durante tmin en la estación.

IV.3.b – Estrategia del tiempo máximo

En este caso se establece un tiempo máximo de permanencia en las paradas para los coches. Esta estrategia busca prevenir el efecto complementario al anterior, no permitiendo que se atrasen los vehículos que encuentran las paradas muy llenas. De esta manera, si el tiempo necesario para subir a todos los pasajeros esperando en cola supera el umbral, sólo se subirá una porción de ellos (la que dé según el tiempo disponible) y el resto deberá esperar al próximo coche. Lo que no debe evitar esta estrategia es que se bajen del vehículo todos los pasajeros cuyo destino coincida con la parada, ya que en ese caso tendría un fuerte impacto negativo en los usuarios. La lógica para cumplir con todo esto se muestra a continuación. Como se puede

ver, ésta vale tanto para la simulación de una línea de trenes o subtes como de colectivos.

```
if(tiempo>get_Main().tmax)
      {tiempo=get_Main().tmax;
      if(get_Main().tipoColectivo)
            {if(tiempo<2*(adropoff-ddropoff))
                  {tiempo=2*(adropoff-ddropoff);
            };
      }else{if(tiempo<adropoff-ddropoff)
                  {tiempo=adropoff-ddropoff;
            };
      };
};
```

IV.3.c – Estrategia mixta

En esta estrategia se conjugan las dos anteriores, la del mínimo y la del máximo, estableciéndose un tiempo mínimo y un tiempo máximo de permanencia en las paradas a la vez. Así se acota la demora en parada a un intervalo conocido y estrecho para no permitir que los coches se atrasen ni adelanten mucho. La lógica obviamente nace de la conjunción de los dos códigos ya presentados, con lo cual no se agrega información si se la muestra. Lo que sí vale mencionar es que el intervalo de tiempos posibles se convierte en un punto o único valor si *tmax<tmin*. De este modo todos los coches permanecen siempre un tiempo igual a tmax, lo cual minimiza la variabilidad de las frecuencias de una manera un tanto brusca para los pasajeros. Esto se desarrollará más en detalle en la sección *V*.

IV.3.d – Estrategias adaptativas

Las estrategias adaptativas incluyen a la estrategia del mínimo adaptativa, la estrategia del máximo adaptativa y la estrategia mixta adaptativa. La diferencia con las estrategias anteriores consiste en que este último tipo es capaz de decidir qué valores de tmin y tmax son más convenientes a lo largo de la corrida y variarlos de manera acorde.

Cabe aclarar que si bien los anteriores métodos fueron tomados de Gershenson y Pineda, éste parte de lo planteado por ellos como modelo adaptativo pero tiene importantes modificaciones. Gershenson y Pineda hacían una comparación entre la cantidad de pasajeros en el sistema (en colas y en los vehículos) y la capacidad total de los vehículos en circulación para tomar la decisión de aumentar o disminuir tmin y tmax. Si la cantidad de pasajeros en el sistema superaba a la capacidad total, afectada por ciertas constantes, se

aumentaban tmin y tmax, y viceversa (para mayor detalle recurrir a [11]). Estas decisiones se basaron en sus observaciones sobre el desempeño del sistema frente a distintos tmin y tmax. Si bien estos métodos arrojan mejores resultados - tomando las constantes de Gershenson y Pineda - para escenarios como los planteados por ellos, no sucede lo mismo cuando se plantean casos en los que los valores de los inputs son cercanos a los reales para una línea de colectivos. Por esta razón, y en vista de tomar provecho de la estructura ideada por los autores para incluir otro planteo hecho por varios autores más, se decidió modificar las estrategias adaptativas. Como se ha visto, hay un tradeoff para los pasajeros entre el tiempo de espera en paradas y el tiempo demorado en paradas siguientes dentro del colectivo. La idea es que esta estrategia tenga en cuenta tanto a **la gente esperando en cola** – que se puede ver favorecida por la aplicación de una estrategia de control como el *Holding* porque, como ya se dijo, a menor variabilidad de las frecuencias menor es el tiempo de espera promedio en cola - como a los **pasajeros que se encuentran arriba de los vehículos** - que se pueden ver perjudicados por la detención de ellos gracias a la existencia de un tmin por ejemplo. La manera de lograr esto fue comparando el tiempo de espera en cola multiplicado por la cantidad de pasajeros en cola contra el tiempo de demora en paradas multiplicado por la gente arriba de los vehículos, y teniendo en cuenta a su vez el costo mayor en la utilidad que tiene el tiempo esperando en cola con respecto al gastado ya en los coches, mencionado por Mohring et al. (1987). A continuación se muestra el mecanismo de autorregulación para tmin.

```
if(costomaxmin*(ΔtiemposEsperaProm/Δtadapta)*
(ΔpasajerosColaProm/Δtadapta)>(ΔdemoraPasajerosProm/Δtadapt
a)*(ΔcapacidadUtilProm/Δtadapta)*CapMax*vehiculos)
     {tmin++;
};
if(costominmin*(ΔtiemposEsperaProm/Δtadapta)*
(ΔpasajerosColaProm/Δtadapta)<(ΔdemoraPasajerosProm/Δtadapt
a)*(ΔcapacidadUtilProm/Δtadapta)*CapMax*vehiculos)
     {tmin--;
};
if(tmin<tminmin)
     {tmin=tminmin;
};
if(tmin>CapMax)
     {tmin=CapMax;
};
```

Como se puede ver, a tmin hubo que ponerle límites para que no decreciera demasiado ni aumentara más que el tiempo que lleva cargar un vehículo desde cero hasta su máxima capacidad. Del código también se desprende que en vez de tomar las variables como tales se buscó analizar su

evolución para que la estrategia pudiera ir previniendo los cambios en las variables. Esto se hizo a través de sus derivadas, que en realidad se aproximaron a los deltas de las variables en cierto Δt, que indica cada cuanto se ajustan los tmin y tmax y puede ser variado. Para todas las corridas realizadas para este trabajo el tiempo de actualización fue de 100 segundos.

De manera similar se armó el código para la autorregulación de tmax (Ver *VIII.3*), y ambos códigos utilizados a la vez conforman la estrategia adaptativa mixta. Las constantes adoptadas, como por ejemplo costominmin, y sus valores se pueden encontrar también en *VIII.3*.

Por último, se quiere aclarar que cuando se muestren los resultados en la sección V al referirse a los valores de tmin y tmax elegidos en cada ocasión se estará haciendo mención a los valores iniciales, ya que a lo largo de la corrida éstos irán variando en función a lo explicado recientemente.

IV.3.e – Estrategia umbral estática

La estrategia umbral estática tiene cierta similitud con la del tiempo mínimo, en el sentido de que necesita de un valor umbral o límite contra el cual comparar para decidir cuánto tiempo se detiene un vehículo. La estrategia del tiempo mínimo se fijaba cuanto tiempo se iba a necesitar demorar un coche en la parada en base a cuantos pasajeros se iban a bajar y subir en dicha parada, y si ese tiempo era menor a tmin - el valor umbral adoptado – se detenía al coche el tiempo necesario para que se cumpliera ese tmin. En el caso de la estrategia umbral estática no se tiene en cuenta la cantidad de pasajeros a subir o bajar en la estación en cuestión, lo que determina cuánto tiempo se detiene el vehículo es el tiempo entre la llegada a la estación de éste coche y su predecesor (denominada en el modelo como **última frecuencia** o **ultfrecuencia**). De esta forma, cuando llega un coche a la parada se calcula la diferencia en segundos entre esa llegada y la anterior registrada. Si esa diferencia es menor al umbral establecido al comienzo de la corrida, entonces al tiempo que permanecerá el coche en la parada para subir y bajar los pasajeros necesarios se le suma un tiempo adicional de demora en parada igual a la diferencia entre el umbral y la última frecuencia observada.

Esta estrategia es menos preventiva que la del tiempo mínimo, porque actúa una vez que ya se nota cierto amontonamiento, pero de todos modos puede resultar efectiva ya que busca corregir el amontonamiento tempranamente. Se muestra el código en Java de la estrategia a continuación:

```
if(ultfrecuencia<get_Main().umbral)
     {tiempo+=get_Main().umbral-ultfrecuencia;
};
```

IV.3.f – Estrategia umbral dinámica

Esta estrategia es una especie de método adaptativo para la estrategia umbral. En este caso la variable a adaptar es el tiempo umbral y la adaptación se lleva a cabo cada vez que un coche llega a una parada y se calcula su demora en la parada. La lógica de regulación también incluye un límite inferior y superior para el umbral. Ésta se muestra a continuación:

```
 if(ultfrecuencia<get_Main().umbralmin)
      {get_Main().umbral=get_Main().umbralmin;
}else if(ultfrecuencia>=get_Main().umbralmin &&
ultfrecuencia<=get_Main().umbralmax)
      {get_Main().umbral=1.1*ultfrecuencia;
}else{get_Main().umbral=ultfrecuencia;
};
```

Según esta lógica, suponiendo que el umbral inicial es 10 segundos y los umbrales mínimo y máximo son 8 y 11 respectivamente; se pueden dar tres casos, que aquí se presentan con ejemplos:

- que la última frecuencia valga 7 segundos (menor al umbral mínimo), con lo cual el umbral valdrá 8 y el tiempo agregado de detención será 1 segundo.
- que la última frecuencia valga 9 (entre el umbral mínimo y el máximo), con lo cual el umbral será 9.9 y el tiempo agregado de detención será de 0.9 segundos.
- que la última frecuencia valga 12 segundos (mayor al umbral máximo), con lo cual el umbral valdrá lo mismo que la última frecuencia y no se agregará tiempo de demora.

Obviamente luego de esta lógica la estrategia incluye la lógica básica umbral mostrada en *IV.3.e*. Las estrategias umbral estática y dinámica fueron adaptadas del trabajo hecho por Rossetti y Turitto [12].

IV.3.g – Estrategia doble

A diferencia del resto de las estrategias ya nombradas, la estrategia doble tiene en cuenta la separación temporal del coche en cuestión con su predecesor y su sucesor. Esta estrategia fue tomada de Turnquist (1982). Hasta ahora sólo algunas estrategias miraban la primera, que fue denominada última frecuencia. Lo que se trata de hacer en esta estrategia es emparejar dichas separaciones, deteniendo al coche la mitad del tiempo que surge de la diferencia entre la separación de éste con su sucesor – denominada en el modelo como **frecatras** - y la separación de éste con su predecesor. El código empleado es el siguiente:

```
if(ultfrecuencia<frecatras)
     {tiempo+=(frecatras-ultfrecuencia)/2.0;};
```

IV.4 ♦ DESARROLLO DE LA INTERFASE Y ANIMACIÓN

En este apartado se propone describir brevemente la manera en que se armó el modelo para que se pudiera:

i. variar las características principales de una línea (inputs del modelo) de manera personalizada, de modo que el modelo permitiera estudiar distintas líneas y los efectos de diferentes estrategias sobre ellas.
ii. ver a cada componente del modelo (agentes y entidades) y estudiar su comportamiento a lo largo de una corrida, en definitiva para que se lograra una mayor comprensión de lo que iba sucediendo.
iii. exportar los indicadores principales definidos como outputs (Ver *Tabla IV.2*) a una planilla de cálculos para permitir distintas formas de presentación de los resultados, además de las armadas en ii.

Ahora se muestra el panel de inicio de una corrida; en donde, como se puede ver en la *Figura IV.5*, se puede elegir qué estrategia probar además de los valores de cada input del modelo.

Figura IV.5 – Panel de inicio de una corrida

Se puede notar que el tablero está dividido en dos secciones. A la izquierda se encuentra todo lo referido a las estrategias; en donde se elige la estrategia a aplicar y en función a eso los valores de los parámetros que corresponda: tmin, tmax, tadapta y umbral. A la derecha se le puede cambiar los valores a cada uno de los parámetros de la línea, se puede variar la duración de la corrida, y se puede decidir si exportar o no los resultados de ella.

Una vez que se acciona el botón “Run”, comienza la corrida y en el panel principal se pueden ver los siguientes gráficos:

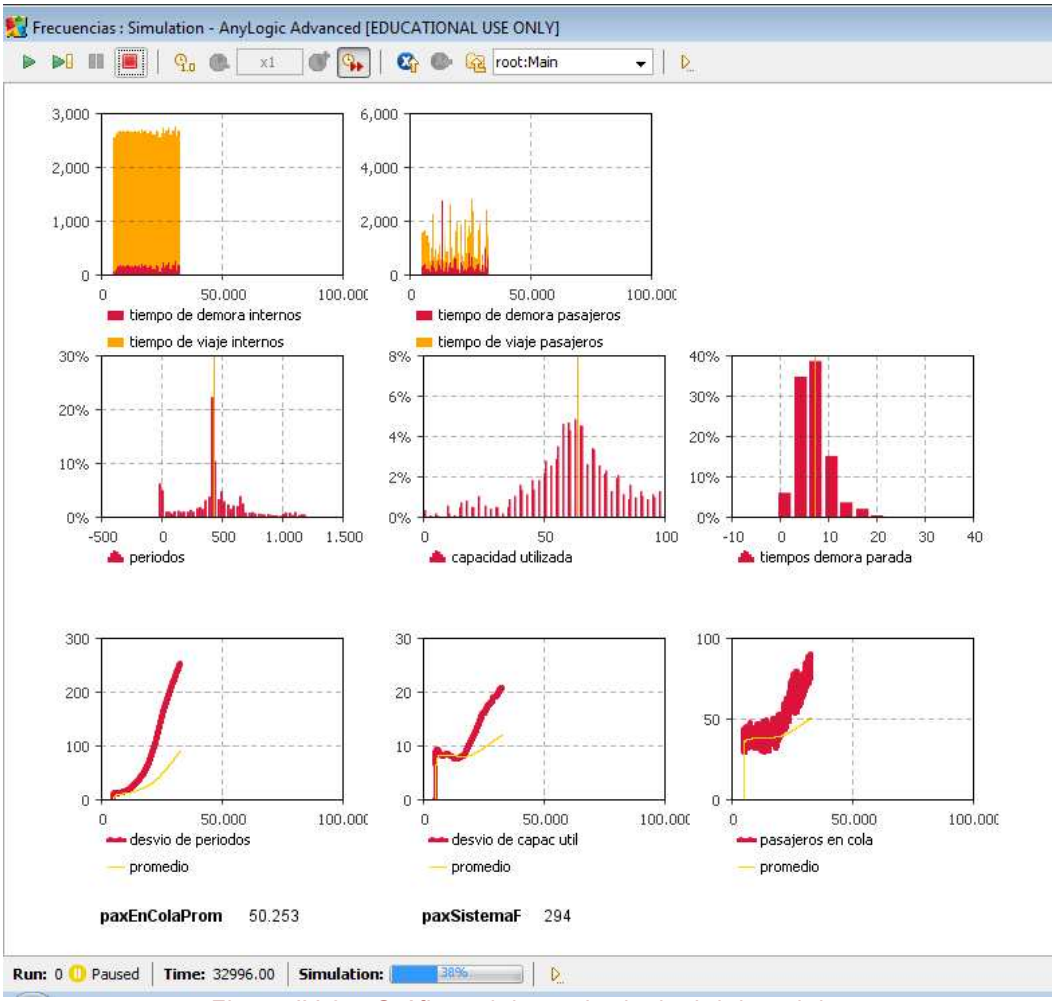

Figura IV.6 – Gráficos del panel principal del modelo

Estos gráficos están ordenados por tipo. En la parte superior se encuentran los gráficos de área o acumulativos, que muestran el tiempo total de viaje tanto para los internos como para los pasajeros como una suma del tiempo de demora y el tiempo de viaje o en movimiento. En la parte intermedia de la pantalla están los histogramas; que muestran la distribución de los períodos (a lo que también nos referimos en este trabajo como “frecuencias”), la capacidad utilizada u ocupación porcentual de los coches, y el tiempo de demora en las paradas. El último grupo de gráficos simplemente muestra la evolución de algunas variables y sus promedios en el tiempo. En este caso se

muestra la evolución del desvío de los períodos, el desvío de la capacidad utilizada y los pasajeros en cola en toda la línea.

Para ayudar en el entendimiento de lo que va sucediendo en el modelo, además de los gráficos de la *Figura IV.6* se cuenta con la animación del modelo. Esta se muestra en la *Figura IV.7*.

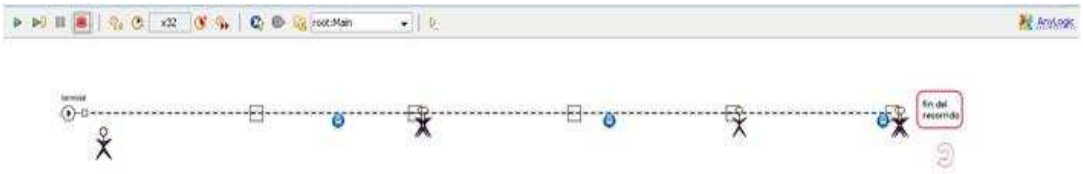

Figura IV.7 – Animación del modelo

La animación incluye a las paradas, los pasajeros, los vehículos y la terminal; y mediante ella se puede ir observando cómo los vehículos salen de la terminal, van recorriendo la ruta, levantando y dejando pasajeros en las paradas. La animación es también una de las más importantes herramientas con las que se cuenta en el modelo para detectar errores y fallas en el sistema, por eso no sólo ayuda posibles usuarios posteriores del modelo a comprenderlo sino que también le sirve al creador.

La tercera y última componente de la interfase del modelo es la que permite exportar todos los datos deseados de una corrida a una planilla de cálculo, en donde luego los resultados podrán ser comparados y presentados a gusto. En este caso se decidió exportar los datos que se muestran en la siguiente tabla, en donde se muestran a modo de ejemplo los resultados de algunos escenarios planteados.

Caso	tTotal Interno	tViaje Interno	tDemora Interno	tTotal Cliente	tViaje Cliente	tDemora Cliente	dCap	dFrec	Pasaj EnCola	PasajFinal EnSist	tEspera	kmHasta Rotura
variando v s/tramo	3168.4	3000.0	168.4	1930.0	1469.0	461.0	7.3	23.0	39.0	314.0	234.0	49.5
sin variar v	2661.0	2500.0	161.0	1641.8	1449.6	192.2	8.1	26.1	38.5	279.0	230.6	47.0
variando v s/hora	2875.4	2500.0	375.4	1781.1	1452.7	328.4	7.8	24.8	43.4	343.0	259.1	38.0
variando v s/tramo y s/hora	3410.9	3000.0	410.9	2095.4	1496.1	599.3	7.3	27.8	44.1	399.0	263.1	27.5

Tabla IV.4 – Exportación del modelo a planilla de cálculos

< V > RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez desarrollado y validado el modelo, se agregaron a él las distintas estrategias de control explicadas en la sección *IV.3* de manera de poder comenzar a testear la efectividad de cada una para distintos tipos de líneas de colectivos.

V.1 ♦ LOS TIPOS DE LÍNEAS

Se seleccionaron cuatro tipos de líneas, con características distintivas en cuanto a su estructura que generan distinto grado de apelotonamiento. Para cada tipo de línea se verá en esta sección el impacto que genera cada estrategia a través de algunos de los indicadores vistos en la sección *IV.2.d*.

	Línea			
	A	B	C	D
Lambda (seg)	195	215	710	3800
Paradas	50	115	180	90
Velocidad (km/h)	15	18	13	16
Frecuencia (min)	4	5	8	14
DistanciaEparadas (m)	290	500	300	400
CapMax	60	60	60	60

Tabla V.1 – Los tipos de líneas a simular

Como se puede ver en la *Tabla V.1*, a cada tipo de línea se le asignó una letra identificadora. Esta tabla muestra a su vez los valores de los parámetros principales para el modelo en el caso de cada línea. De éstos se desprende que las características distintivas de cada línea son:

- Línea A: pocas paradas cercanas con mucha gente y una alta frecuencia
- Línea B: muchas paradas alejadas con mucha gente y velocidad alta
- Línea C: cantidad media de pasajeros distribuida en muchas paradas cercanas y velocidad muy baja
- Línea D: poca gente en paradas y muy baja frecuencia

A continuación se hacen dos aclaraciones sobre la manera de hacer las corridas con las que se corresponden todos los resultados que se muestran en esta sección.

- Las corridas se hicieron sin tener en cuenta un tiempo máximo de espera, como el que sí entró en juego para las conclusiones que se sacar en la sección *III.3.a*. Se volvió a la

suposición de que no existe competencia y de que por lo tanto los pasajeros esperan en cola el tiempo que sea necesario, no las abandonan.

- Pero por tener las cuatro líneas a estudiar una cantidad de paradas mucho mayor a 20 se redujo el warm up a una vuelta, que en todos los casos significa para los coches haber servido más de 40 paradas.
- La cantidad de paradas que realiza un pasajero se determinó según una distribución normal, con una media de 10 paradas y un desvío de 3 paradas. El cambio se hizo debido a que una distribución discreta se contradecía con la realidad al ser los recorridos de más de 20 paradas. Ambos parámetros fueron tomados de datos reales. Además se validó el modelo con esta distribución también contra el modelo de Gershenson y Pineda.

V.2 ♦ RESULTADOS POR LÍNEA

Para cada línea se hizo una cantidad importante de corridas, variando el tipo de estrategia a tener en cuenta. La mayoría de las estrategias requirieron más de una corrida, ya que interesó también analizar la respuesta del sistema frente a distintos valores de los parámetros concernientes en cada una de ellas. Los resultados de todas las corridas realizadas para cada línea se muestran en la sección VIII.4 en detalle, creyéndose conveniente resumir para este apartado la información de la siguiente manera:

i. **Para cada línea se hizo una primera selección de las diez mejores estrategias** (*Top 10*). Se descartó en primer lugar a las estrategias para las cuales el desvío de las frecuencias (dFrec) mostrara una evolución inestable, exponencial o linealmente creciente. Una vez hecho dicho descarte, se seleccionaron de las restantes las diez con los menores valores de dFrec promedio.

ii. **A continuación se seleccionaron las cinco mejores estrategias** (*Top 5*). Para dicha selección el orden de prioridades fue el siguiente:

   a. Se buscó a las estrategias con menor dFrec promedio

b. A igual o similar valor final de dFrec promedio se optó por aquellas estrategias cuyos tiempos totales [19] para los internos y los pasajeros fueran menores.

iii. Se comparó a las cinco mejores estrategias de cada línea entre sí en base a los principales indicadores de la eficiencia de una línea definidos en el apartado *IV.2.d*. Así se ranqueó al Top 5 de estrategias según cada indicador del 1 al 5.

Los gráficos que surgen de dicho proceder se muestran a continuación. Cabe aclarar que se abrevió a las estrategias umbral estática y dinámica, denominándolas en la *Figura V.1* “umbrale” y “umbrald”; y que los números que acompañan a los nombres de las estrategias se corresponden con los valores de los principales parámetros de cada una de ellas - tmin para las del mínimo, tmax para las del máximo, tmin y tmax para las mixtas y umbral para las umbrales. Por último, a las estrategias adaptativas se les antepuso una “a” en la *Figura V.1* y en las tablas del anexo *VIII.4*.

[19] Tener en cuenta los tiempos totales es lo mismo que tener en cuenta los tiempos de demora para vehículos y pasajeros explicados en la *Tabla IV.2* en este caso ya que los tiempos de viaje (en movimiento) no dependen de la estrategia que se aplique y son contantes.

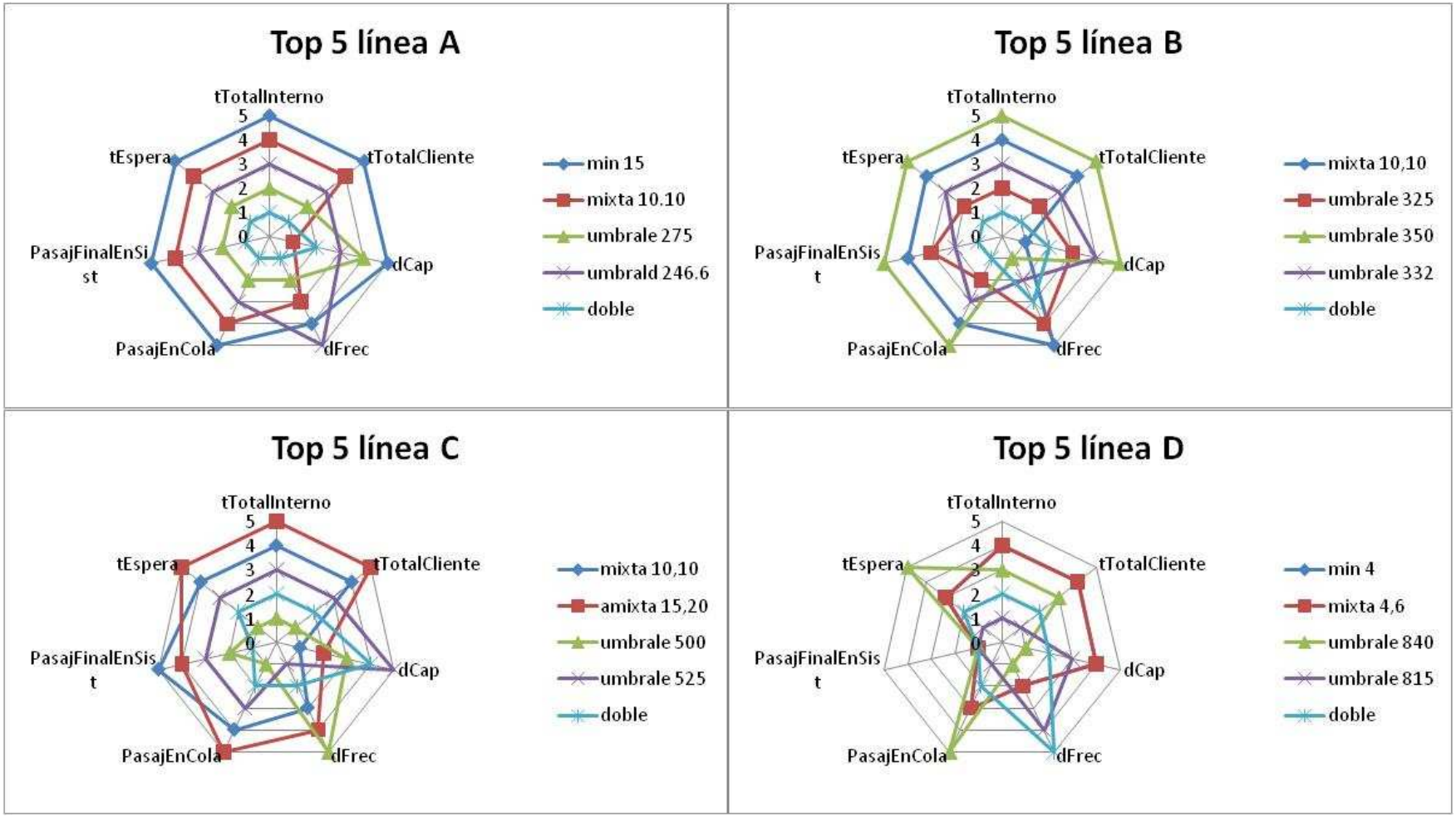

Figura V.1 – Comparación de estrategias por línea

Como se puede ver, la idea no es quedarse con una estrategia óptima, sino mostrar en qué aspectos cada estrategia es más o menos óptima para la línea en cuestión. En base a lo que la empresa proveedora del servicio defina como indicador a optimizar se podrá luego elegir fácilmente la estrategia más adecuada.

Se optó por este tipo de análisis comparativo para poder ver simultáneamente el producto de cada estrategia con respecto a los distintos aspectos importantes de una línea. Así, si bien para algunas líneas permite notar una estrategia predominante en la mayoría de dichos aspectos o indicadores, como es el caso de la estrategia doble para la línea A; las conclusiones a las que se puede llegar son mucho más amplias, como que para la línea C las estrategias umbral estática de 500 segundos y mixta 10,10 son complementarias.

De la *Figura V.1* se pueden hacer bastantes observaciones, algunas son las siguientes:

- En la línea D los resultados de las estrategias min 4 y mixta 4,6 coinciden por completo, por eso no se nota la primera dentro del gráfico.
- Para la línea A se puede encontrar un marcado primer puesto dentro del Top 5 (estrategia doble) y también un quinto puesto (estrategia min 15). En el otro extremo se encuentra la línea D en la cual las estrategias varían mucho su posición para los distintos outputs claves.
- No hay ninguna estrategia en la figura que ocupe la misma posición para los siete outputs, o sea que forme un heptágono regular.
- Por lo general las estrategias umbral estáticas tienen su peor puntaje en dCap, es decir que el desvío de la capacidad aprovechada es un punto débil para este tipo de estrategia.

A continuación se muestra el ranking de presencia en los Top 5, como porcentaje sobre el total de puestos (20).

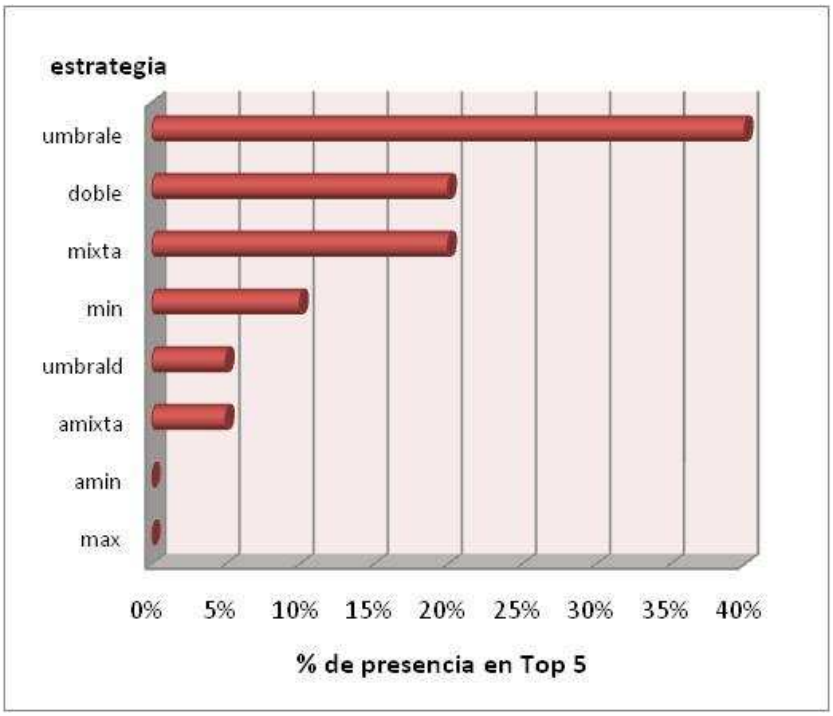

Figura V.2 – Ranking de presencia en los Top 5

Otro aspecto muy importante a mostrar reside en la mejora del desvío de frecuencias promedio (dFrec) que se logra con las estrategias mostradas en la *Figura V.1*. La *Figura V.3* muestra la reducción porcentual del dFrec lograda para cada línea con respecto al dFrec del escenario base (escenario para el cual no se aplica ninguna estrategia de control), que sería el equivalente a la situación vivida actualmente en aquellas líneas de colectivos. La gran importancia de este gráfico radica en que demuestra que se logró con éxito el objetivo principal planteado para este trabajo.

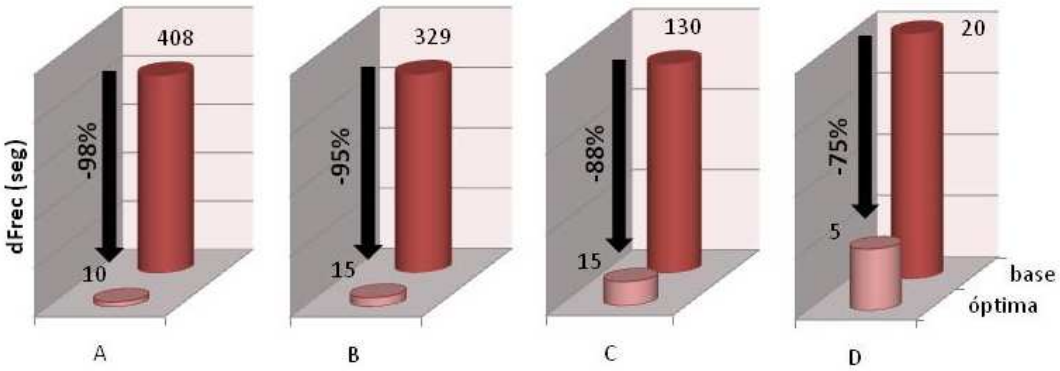

Figura V.3 – Mejora del dFrec con respecto al escenario base, lograda por la estrategia que alcanza el menor dFrec

Las mejoras que se logran en dFrec son mayores cuanto mayor es la frecuencia teórica de la línea. En líneas con poca frecuencia como la D (14 min

entre coche y coche) no alcanza altos valores dFrec luego de un día y por lo tanto las mejoras que se logran son menores.

De todos modos las mejoras son más que significativas para todas las líneas y los valores finales de dFrec alcanzados son más que aceptables.

V.2.a – Particularidades de la línea D

Si bien la línea D no llega a romperse a lo largo de un día de operación, se puede ver en el gráfico del escenario base que tiene un comportamiento similar al de las otras líneas en sus casos base (Ver *Figura V.4*), con lo cual el problema sigue estando presente en esta línea sólo que tarda más en manifestarse.

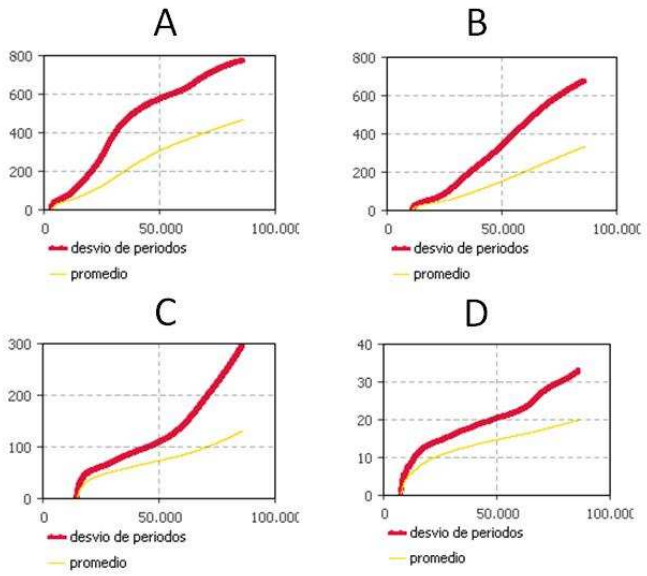

Figura V.4 – Escenario base de las líneas A,B,C y D

También se desprende de los resultados de la línea D que mientras que los tiempos de demora para los vehículos son insignificantes, para los pasajeros representan casi lo mismo que los tiempos en viaje (Ver *Figura V.5*). En este tipo de línea, por la frecuencia que tiene y por lo recién mencionado, se puede llegar a justificar más el control sobre la marcha en base a los itinerarios o tiempos programados. También puede ser útil la implementación de sistemas de información en tiempo real para los pasajeros, que se desarrollará en la sección *VI.4,* especialmente en el caso de esta línea para reducir los grandes tiempos de espera.

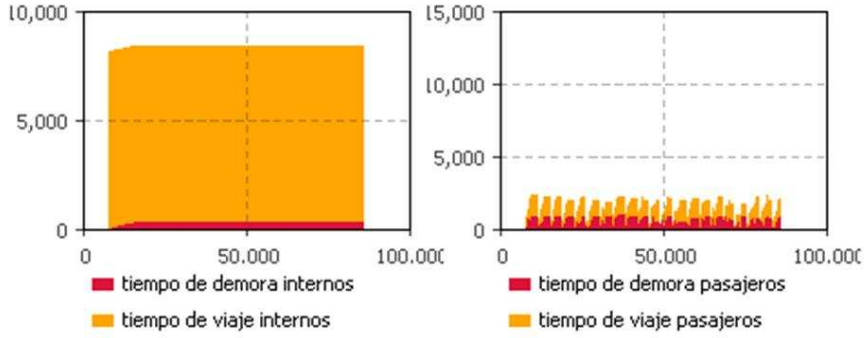

Figura V.5 – Tiempos de viaje y de demora para internos y pasajeros en línea D

V.3 ♦ RESULTADOS POR TIPO DE ESTRATEGIA

Además de analizar qué estrategias resultan favorables para distintas líneas con sus características particulares, se van a aprovechar las corridas realizadas para sacar conclusiones más generales sobre cada tipo de estrategia, tratando de independizar el análisis de las particularidades de cada línea estudiada.

V.3.a – Estrategia del mínimo

La efectividad de la estrategia del mínimo depende fuertemente del valor asignado a su único parámetro, tmin, y obviamente depende también del tipo de línea y sus parámetros. De todos modos se puede ver que a valores bajos de tmin (el valor exacto del que se trate dependerá de la línea en cuestión), la estrategia no resulta favorable ya que casi no tiene impacto en el comportamiento de la línea. Por lo tanto en estos casos se ve que el comportamiento de dFrec es inestable, manteniéndose éste constante y en valores bajos por un tiempo y luego aumentando considerablemente hasta alcanzar valores indeseados. Se termina dando el fenómeno de apelotonamiento, con cierta demora. Esto se ejemplifica en la Figura V.6 con el caso de la estrategia del mínimo con tmin igual a 5 segundos aplicada a la línea B.

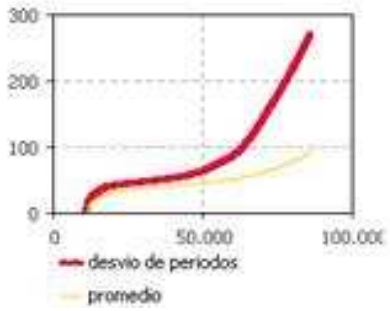

Figura V.6 – Estrategia del mínimo aplicada a línea B (tmin= 5 seg)

Sin embargo, a valores más altos de tmin la estrategia empieza a tener efecto sobre el desvío de las frecuencias. A medida que aumenta tmin

disminuye dFrec, con un efecto secundario indeseado – el aumento de los tiempos totales para los internos y pasajeros por las mayores demoras en parada. Salvando ese efecto secundario, se logra evitar el apelotonamiento, y ocurre también que se puede encontrar para cada línea un valor óptimo de tmin para el cual se alcanza el menor dFrec posible dentro de esta estrategia. Si se excede dicho valor de tmin dFrec aumenta y los tiempos totales siguen aumentando, con lo cual dichos casos no resultan útiles. Se muestra aquí dicho patrón, se tomó como ejemplo lo observado en las corridas de la línea A.

Caso	tTotal Interno	tTotal Cliente	dCap	dFrec	Pasaj EnCola	PasajFinal EnSist	tEspera	Comentarios
min 5	3994.0	1651.1	14.8	235.6	235.4	738.0	907.1	inestable
min 10	3942.3	898.0	6.6	21.8	36.5	238.0	144.9	estable
min 15	**4185.4**	**948.2**	**6.6**	**14.6**	**38.6**	**251.0**	**152.9**	**óptimo**
min20	4428.2	999.8	6.7	21.3	41.0	259.0	162.1	>dFrec, >tiempos

Tabla V.2 – Patrón observado de la estrategia del mínimo

Para las líneas estudiadas los valores óptimos de tmin van desde 4 segundos – para la línea D que recibe pocos pasajeros - hasta 15 segundos.

V.3.b – Estrategia del máximo

Gershenson y Pineda utilizaron la estrategia de máximo como un complemento para la estrategia del mínimo, lo que ellos llamaron estrategia del máximo en realidad era una estrategia mixta según este trabajo. Aquí se quiso testear la reacción del sistema frente al único control de un tiempo máximo de demora en las paradas. Desafortunadamente, dicha estrategia probó no ser efectiva a la hora de evitar el apelotonamiento de vehículos. Esto se debe a que sigue permitiendo que los vehículos que encuentran poca gente en las paradas se acerquen a su predecesores dejando a la vez mayor espacio entre ellos y sus sucesores y aumentando así el desvío de las frecuencias.

Por no resultar beneficiosa la estrategia del máximo se corrió con distintos valores de tmax únicamente para la línea A y a continuación se muestran los resultados.

Caso	tTotal Interno	tTotal Cliente	dCap	dFrec	Pasaj EnCola	PasajFinal EnSist	tEspera
base	4168.9	1928.5	21.3	**408.1**	291.8	563.0	1141.4
max 10	4066.5	2043.9	19.8	**432.5**	329.5	766.0	1278.0
max 15	4061.0	1839.7	21.2	**409.2**	277.2	770.0	1070.1
max 20	4117.1	2035.1	21.3	**427.2**	323.0	686.0	1259.6
max 25	4131.5	2006.59	21.5	**421.2**	314.76	663	1228.7

Tabla V.3 – Resultados de la estrategia del máximo aplicada a la línea A

V.3.c – Estrategia mixta

Lo primero que cabe recalcar es que para las cuatro líneas se logró encontrar una estrategia mixta que supere al caso óptimo de las estrategias del mínimo. Esto ya prueba que se justifica el aporte de la condición del máximo. Hay casos en que la mejor estrategia mixta tiene el mismo valor de tmin que la estrategia óptima del tiempo mínimo. Por ejemplo, para la línea B se da lo siguiente:

Caso	tTotal Interno	tTotal Cliente	dCap	dFrec	Pasaj EnCola	PasajFinal EnSist	tEspera	Comentarios
min 15	13083,9	1396,5	**11,2**	**25,9**	104,5	675,0	251,7	óptima del min
mixta 15,20	13083,6	1396,5	**11,1**	**23,8**	104,5	675,0	251,8	<dFrec que anterior
mixta 15,15	**13082,8**	**1396,3**	**10,9**	**23,0**	104,6	676,0	251,8	<dFrec y tiempos

Tabla V.4 – Distintas estrategias mixtas aplicadas a la línea B

Como se puede ver en la *Tabla V.4* la estrategia mixta 15,20 (significa tmin= 15 seg, tmax= 20 seg) tiene menor dFrec y menores valores también en el resto de los indicadores que la estrategia del tiempo mínimo de 15 segundos. A su vez, la estrategia mixta 15,15 supera en ambos sentidos a las dos anteriores y alcanza también un menor dCap.

Pero esto no siempre se da en el valor del mínimo óptimo. En la línea C el valor óptimo es 15 segundos y la estrategia mixta 10,10 supera a la mixta 15,15. Lo que sí se cumple siempre, como se dijo, es que con la estrategia mixta se pueden encontrar combinaciones que superan ampliamente a la estrategia del mínimo correspondiente y a la del mínimo óptima.

Otra observación que se aplica a todas las líneas consiste en que pueden coincidir los resultados de una estrategia del mínimo y una mixta. Esto sucede en casos en que la condición del máximo no se termina utilizando porque los tiempos de demora necesarios en parada nunca superan al tmax asignado. Un ejemplo claro de esto se da para la línea D y se muestra aquí.

Caso	tTotal Interno	tTotal Cliente	dCap	dFrec	Pasaj EnCola	PasajFinal EnSist	tEspera
min 4	8451.9	1341.5	4.6	5.2	9.7	0.0	425.9
mixta 4,6	8451.9	1341.5	4.6	5.2	9.7	0.0	425.9
mixta 4,4	8451.9	1341.5	4.6	5.2	9.7	0.0	425.9

Tabla V.5 – Mismos resultados para estrategias mixtas y del mínimo en línea D

Una última característica en común que se da es que las estrategias mixtas con el mismo valor de tmin y tmax, por ejemplo la mixta 15,15, siempre superan a la estrategia del tiempo mínimo cuyo valor de tmin coincide con ese valor, en este caso la del mínimo 15. Sucede en las mixtas de este tipo que los

tiempos totales de los vehículos y pasajeros son ligeramente inferiores que las del mínimo correspondientes y dFrec es menor. Como son muchos los casos a mostrar, para su corroboración se puede recurrir a la sección *VIII.4*.

V.3.d – Estrategias adaptativas

Primero se mencionarán los aspectos comunes a todas las líneas concernientes a este tipo de estrategias.

La principal ventaja de éstas es que si se arranca la corrida con un valor de tmin bajo, en los casos en que dicho valor no alcanzaría para hacer estable la línea, la adaptativa lo soluciona sola. Esto lo hace aumentando el tmin a lo largo de la corrida y generando de esta manera un comportamiento estable de dFrec en valores acotados.

Además, al estudiar la evolución de tmin y tmax cuando se aplican estrategias adaptativas mixtas se puede ver que los valores de tmin y tmax tienden a acercarse mucho para un optimo funcionamiento de la línea, lo cual se corresponde con los buenos resultados que surgen por lo general de las estrategias mixtas no adaptativas cuyo valor de tmin coincide con el de tmax – éstas ocupan 3 de los 20 puestos en el *Top 5* de las cuatro líneas.

Por otro lado, las estrategias adaptativas tienen una desventaja importante que es la tendencia a generar mayores tiempos totales para pasajeros e internos porque para asegurar esa estabilidad siempre tiende a valores altos de demora en paradas.

Otro aspecto que surge del análisis de los resultados para este tipo de estrategias consiste en que la mejor estrategia adaptativa mixta se corresponde con la mejor estrategia mixta, pero aquella ofrece peores resultados. Algunos casos se muestran en la *Tabla V.6*. Cabe aclarar que a veces no se encuentra “la mejor” estrategia entre las mixtas sino que hay un par buenas que compiten y por eso en la sección *V.2* entran ambas o una de ellas (si son idénticos los resultados) en el *Top 10* o *Top 5*. Estos casos también se muestran en la *Tabla V.6*.

Linea	Caso	tTotal Interno	tTotal Cliente	dCap	dFrec	Pasaj EnCola	PasajFinal EnSist	tEspera
A	mixta 5,10	3975,4	1629,3	13,3	219,9	231,2	754,0	887,8
A	mixta 10,10	3942,0	897,8	6,0	10,9	36,4	237,0	144,8
A	amixta 5,10	4389,1	993,6	6,9	27,4	41,0	258,0	162,2
A	amixta 10,10	4121,9	936,9	6,7	23,9	38,3	249,0	151,8
B	mixta 5,10	12106,3	1394,8	11,8	76,2	152,6	998,0	332,0
B	mixta 10,10	12561,4	1346,9	10,4	24,2	100,5	652,0	245,0
B	amixta 5,10	12741,1	1367,3	10,6	24,9	102,2	664,0	247,9
B	amixta 10,10	12741,1	1367,3	10,6	24,9	102,2	664,0	247,9
C	mixta 5,10	15772,3	1204,0	6,3	29,9	66,5	281,0	295,5
C	amixta 5,10	16687,8	1267,6	6,4	23,9	70,6	289,0	310,6
C	amixta 10,10	16687,8	1267,6	6,4	23,9	70,6	289,0	310,6
C	amixta 15,20	16712,5	1269,0	6,4	21,7	70,5	290,0	311,2

Tabla V.6 – Coincidencias en mejores resultados de estrategia mixta y adaptativa mixta

Ahora se mencionarán algunos aspectos que son particulares de algunas líneas, pero resultó importante destacarlos.

En primer lugar, en las líneas A y B se ve que al comparar la estrategia adaptativa mixta 5,10 contra la mixta 5,10 la primera arroja menores tiempos de demora para pasajeros y mayores tiempos de demora para los internos – ya que tmin y tmax terminan siendo mayores. A su vez la adaptativa es estable mientras q mixta 5,10 es inestable.

En segundo lugar, la línea D es un caso especial en lo que respecta a esta estrategia. En esta línea sucede que los resultados son independientes de los valores iniciales que se le den a tmin y tmax. Además le estrategia no resulta eficiente ya que produce un comportamiento de dFrec inestable y tiempos totales de internos y pasajeros muy grandes.

Con respecto a la independencia de los valores iniciales mencionada en el anterior párrafo, se nota que esto ocurre en el resto de las líneas en mayor o menor medida (en mayor medida en la D, luego la C, B y A). Al tratar de encontrarle una explicación a esto, se vio que en el mismo orden disminuye λ. Esto significa que como la línea D recibe menos gente tiene menos probabilidad de que se acumule más gente en cierto momento y esto hace que una vez que el método adaptativo logró alcanzar valores de tmin y tmax óptimos (según el método) estos se mantengan estables. Así la mayoría de la corrida transcurre con valores similares de tmin y tmax, una vez alcanzados estos - que dependen de los parámetros de la línea y no los iniciales correspondientes a la estrategia – resultando los valores de los outputs prácticamente iguales.

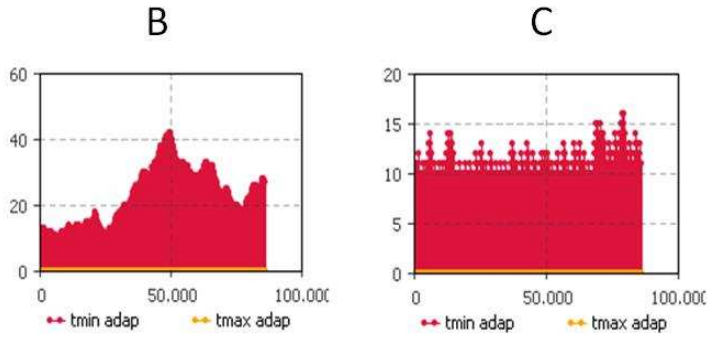

Figura V.7 – Evolución de tmin con la estrategia amin 5 para líneas B y C.

Por último, en las líneas en que los resultados no son completamente independientes de los valores iniciales de tmin y tmax, se ve que el comportamiento de dFrec es más estable a medida q aumentan dichos valores iniciales.

V.3.e – Estrategia umbral estática

Lo primero a recalcar, que dará una idea de lo eficiente que resulta este tipo de estrategia, es que en el *Top 5* de cada una de las cuatro líneas simuladas hay por lo menos un lugar ocupado por una estrategia umbral estática.

A su vez, al analizar el impacto de este tipo de estrategia se nota que si el umbral es menor a la frecuencia teórica de la línea dFrec alcanza valores altos e indeseados. Por otro lado, a partir de la frecuencia teórica al aumentar el umbral se reduce dFrec, a costo de mayores tiempos de viaje o no. Existe un umbral óptimo, mayor al valor de la frecuencia teórica de la línea, que es la última estrategia para la cual se aumenta el umbral y se reduce dFrec. Se puede ver que superado ese valor umbral si éste se aumenta más, aumentan tanto dFrec como los tiempos totales para internos y pasajeros. Y también se puede ver que entre la frecuencia teórica como valor para el umbral y el umbral óptimo dFrec tiene un comportamiento decreciente a lo largo de la corrida, lo que quiere decir que con ese valor umbral no le alcanza a dFrec para reducirse todo lo posible. Esto último se muestra a continuación.

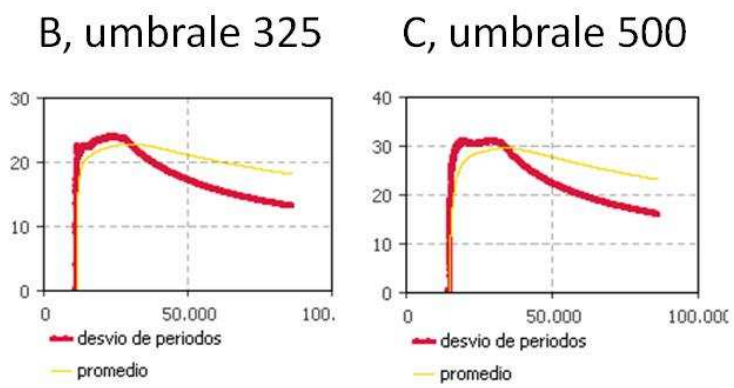

Figura V.8 – Desvío de las frecuencias decreciente para dos casos de estrategia umbral estática de dos líneas distintas

La *Tabla V.7* demuestra todo lo explicado en el párrafo anterior sobre la estrategia umbral estática.

Linea	Caso	tTotalInterno	tTotal Cliente	dCap	dFrec	Pasaj EnCola	PasajFinal EnSist	tEspera	Comentarios
A	umbrale 225	4251.8	1175.9	17.9	252.1	94.4	327.0	369.3	inestable
A	umbrale 240	3892.35	922.469	11.1	105.4	45.142	252	178.116	frec teo
A	umbrale 275	3809.2	869.8	6.3	10.0	35.3	226.0	139.8	óptima
A	umbrale 300	4071.3	924.6	6.5	12.7	37.7	241.0	149.3	>dFrec, >tiempos
B	umbrale 275	12737.2	1551.1	15.3	156.8	210.8	1011.0	439.0	inestable
B	umbrale 300	12582.6	1470.9	13.2	104.0	168.1	870.0	365.3	frec teo
B	umbrale 325	12281.0	1321.3	11.0	18.0	98.9	631.0	241.4	sigue decreciendo dFrec
B	umbrale 350	12860.4	1377.6	11.1	14.7	103.9	663.0	250.4	óptima
B	umbrale 400	14176.2	1505.0	11.3	34.8	116.7	727.0	274.2	>dFrec, >tiempos
C	umbrale 450	15346.0	1176.7	6.6	52.8	65.4	273.0	292.2	inestable
C	umbrale 480	15394.4	1178.8	6.5	40.8	65.3	269.0	291.6	frec teo
C	umbrale 500	15519.7	1184.3	6.5	23.0	65.1	274.0	291.2	sigue decreciendo dFrec
C	umbrale 525	16035.2	1222.2	6.5	14.8	67.8	279.0	301.4	óptima
C	umbrale 550	16607.4	1263.8	6.6	16.8	70.6	292.0	312.5	>dFrec, >tiempos

Tabla V.7 – Distintos casos de estrategias umbral estáticas.

Todo lo establecido hasta ahora de la estrategia umbral estática se aplica a todas las líneas menos la D. Ésta tiene un comportamiento completamente distinto, empezando por el hecho de que dFrec es estable cuando el umbral toma el valor de la frecuencia teórica de la línea, que se puede ver en la *Figura V.9*.

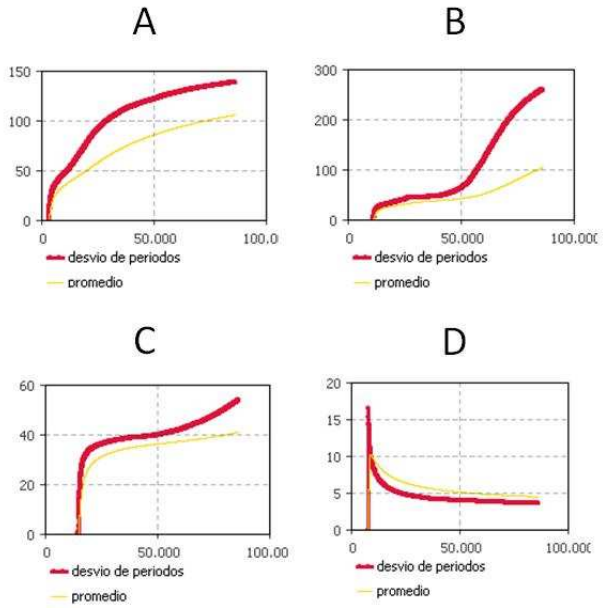

Figura V.9 – Evolución de dFrec con la estrategia umbral estática y valor del umbral equivalente a su frecuencia teórica

De hecho en la línea D el valor de umbral óptimo resulta ser el de la frecuencia teórica. Si se reduce este valor dFrec sigue siendo estable, pero mayor en promedio que cuando umbral equivale a la frecuencia teórica. Sí se cumple que si seguimos aumentando el valor umbral, a partir del óptimo, los dFrec promedio y los tiempos totales aumentan. Con lo cual para la línea D se sigue encontrando un umbral óptimo, la diferencia es que dicho valor equivale a la frecuencia teórica, mientras que en las otras líneas era mayor a ésta.

V.3.f – Estrategia umbral dinámica

Algunos de los aspectos a resaltar de esta estrategia son los siguientes.

En primer lugar, que los resultados son independientes del valor inicial que se le asigne al umbral.

Además, que el valor del umbral al final de la corrida siempre es mayor a la frecuencia teórica de la línea, lo cual se corresponde con una de las conclusiones arribadas para la estrategia umbral estática en la que se establecía que el umbral óptimo se alcanzaba a valores mayores que la frecuencia teórica, excepto para la línea D.

En tercer lugar, que por lo general hay estrategias estáticas que superan a la dinámica. De todas las corridas que se hicieron para las cuatro líneas sólo una logra competir con la mejor de las estáticas en la línea A porque logra menores desvíos de capacidad aprovechada. Sólo esa entró en el *Top 5*. De todas formas los resultados que arroja la dinámica son más que buenos, con lo cual no se la debe descartar por su practicidad, ya que a diferencia de la

umbral estática, con la dinámica no se pierde tiempo testeando distintos valores umbrales el cual no es menor.

Por último, esta estrategia no sirve para la línea D ya que lleva el umbral a valores altos que aumentan dFrec. Si bien dFrec tiene un comportamiento estable no compite con los valores arrojados por otras estrategias.

V.3.g – Estrategia doble

Como se puede ver en la *Figura V.1,* la estrategia doble ocupa uno de los cinco lugares del *Top 5* en cada una de las cuatro líneas estudiadas. No sólo eso, a su vez mantiene para las cuatro líneas valores reducidos de los siguientes outputs:

- Cantidad de pasajeros final en el sistema
- Tiempo total de internos
- Tiempo total de pasajeros
- Tiempo de espera en cola

Por todo esto la estrategia doble compite en la mayoría de las líneas con algunas estrategias umbral estáticas, y con alguna que otra estrategia mixta; y en otros casos, como el de la línea A, tiene una clara preponderancia – ocupando el primer lugar para 6 de los 7 principales outputs.

La gran superioridad de la estrategia doble indicaría que cuanta más información del resto de los coches en circulación se tiene se puede hacer funcionar de manera más eficiente a una línea; ya que la estrategia doble es la única en tener en cuenta información sobre el coche que se encuentra en la parada, su predecesor y su sucesor.

< VI > CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

VI.1 ♦ CONCLUSIONES

VI.1.a – El valor aportado

El trabajo permitió en primer lugar un mayor entendimiento de la problemática tratada. Se pudo ver cuáles de las características principales de una línea colaboran con su inestabilidad, cuáles ayudan a reducirla, y en qué medida cada una afecta para bien o para mal.

Por medio de este estudio se logró comprobar que con control sobre la marcha se puede reducir como mínimo en un **75%** el desvío de las frecuencias, generando así líneas más estables con menores tiempos de espera en cola para los pasajeros y mayores ingresos para las compañías proveedoras del servicio. Esto último se debe en primer medida a la recuperación del 25% de pasajeros que abandonaban las filas, como se vio en la sección *III.3.a*, y puede llegar a ser potenciado por la sustitución tan deseada de automóviles a transporte público más a largo plazo gracias al aumento de la calidad del servicio generado.

La tesis también permitió hacer un análisis detallado de algunas estrategias de control sobre la marcha, pudiendo conocer los puntos fuertes y débiles de cada una de ellas. Sobre todo se pudo notar que no hay absolutos cuando se trata de elegir una estrategia de control a aplicar en una línea. Sí se puede seleccionar un grupo de estrategias que presentan buenos resultados y combinarlas cuando sea posible o elegir un output a optimizar y quedarse con la estrategia que mejores resultados muestre para éste.

A continuación se muestra de manera resumida las principales conclusiones a las que se arribó con respecto a las estrategias que se estudiaron.

- En la estrategia del mínimo disminuye dFrec a medida que aumenta tmin, a cotas de mayores tiempos totales de viaje para internos y pasajeros. Se puede encontrar un tmin óptimo para la línea.
- La estrategia del máximo no sirve sola.
- Las estrategias mixtas se hacen más estables a medida q aumentan tmin y tmax pero los tiempos de viaje (para internos y pax) aumentan.

- La estrategia mixta adaptativa muestra que los valores de tmin y tmax tienden a acercarse mucho para un óptimo funcionamiento de la línea.
- En la estrategia umbral estática al aumentar el umbral (a partir del valor de frecuencia teórico) se reduce dFrec. Existe un umbral óptimo, mayor al valor de la frecuencia teórica de la línea, que es la última estrategia para la cual se aumenta el umbral y se reduce dFrec.
- Si el umbral es menor a la frecuencia teórica para la estrategia umbral estática, dFrec alcanza valores grandes e indeseados.
- En la estrategia umbral dinámica los resultados son independientes del valor umbral inicial.
- Las estrategias dinámicas son más prácticas que las estáticas, en el sentido que no requieren varias corridas con distintos valores umbrales para hallar el óptimo. Pero siempre se logran mejores resultados con las estrategias estáticas en su valor óptimo.
- La gran superioridad de la estrategia doble indicaría que cuanta más información del resto de los coches en circulación se tiene se puede hacer funcionar de manera más eficiente a una línea.

VI.1.b – Aplicabilidad de la herramienta

Como ya se mencionó en varias ocasiones, se buscó que las estrategias tratadas en este trabajo pudieran ser aplicadas en el corto plazo en líneas de colectivos. Por eso, de todas las estrategias vistas en la sección *II.1* sólo nos quedamos con las relativas al *Holding*. Éstas son las que menos afectan a los pasajeros durante su viaje, si bien algo lo hacen, ya que ellos no tienen que bajarse en estaciones intermedias y hacer cambios de vehículos, para lo cual tampoco está preparada la infraestructura.

Así se logró desarrollar lógicas de estrategias que se pueden incluir en cualquier sistema de GPS para que dichas estrategias puedan ser implementadas de manera automática en cualquier línea, sin necesitar del control de inspectores a lo largo de una línea.

La empresa de transporte público que colaboró con este trabajo, ya cuenta con GPS en todos sus vehículos, puede realizar este cambio más fácil que nadie en la Ciudad de Buenos Aires. Actualmente la información de la posición de un coche gracias al GPS viaja hasta un servidor que calcula cuántos minutos el coche está atrasado o adelantado con respecto a su itinerario (el coche tiene horarios teóricos que cumplir por sección) y le devuelve al chofer esa información a través de una pantalla ubicada cerca del tablero en los coches. De la misma manera se podría correr el código de

cualquiera de las estrategias mostradas en este trabajo e informarle al chofer cuánto tiempo se debe demorar en cada parada.

En lo que respecta a lo recién dicho, se ha mencionado ya que mientras que las estrategias dinámicas son más prácticas, las estáticas óptimas las superan. Para no descartar estas últimas, que presentan resultados más que satisfactorios, por su falta de practicidad se puede de manera muy simple englobar la lógica presentada para cada una de las estrategias estáticas en este trabajo dentro de una rutina iterativa que antes que nada busque el valor umbral (en el caso de la estrategia umbral estática, para poner un ejemplo) óptimo. A diferencia de las dinámicas, esta nueva alternativa no varía sus parámetros principales (umbral, tmin, tmax) a lo largo de una corrida, sino que realiza varias corridas probando distintos valores para los parámetros que permanecen constantes durante cada corrida que se testea.

Volviendo a lo que se está haciendo actualmente, esa es una manera de control sobre la marcha, pero poco efectiva. Como vimos, en líneas con altas frecuencias se logran mejores resultados si se mantiene estable la línea reduciendo al mínimo es desvío de los tiempos entre arribos de los coches a las paradas, y lo que se está aplicando hasta ahora es un mero control del tipo *schedule-based* que sirve más para líneas de media y larga distancia. Con lo cual ya sólo por el cambio en la metodología se lograrán mejoras significativas en las líneas a tratar.

En segundo lugar, la alternativa que se plantea en este trabajo sobre qué tipo de indicaciones se le da a los choferes por medio de las pantallas en los vehículos es más simple. En este caso no queda librado a las formas de los colectiveros - la manera de ejecutar lo pedido -, mientras que con el dato de los minutos de atraso/adelanto cada chofer se debe fijar cuánto reduce su velocidad o la aumenta y cuándo, pudiendo afectar en mayor medida el comportamiento de éste a los resultados del control.

Por el otro lado, el hecho de que los coches se demoren en las paradas tiene un mayor impacto negativo en los pasajeros a bordo que si los choferes reducen la velocidad a lo largo de un tramo sin detenerse por completo. Para que los pasajeros no se impacienten y preocupen es necesario comunicar los cambios anticipadamente, de modo tal que ellos puedan entender que lo que se está buscando es mejorar la calidad del servicio y que ese tiempo demorado en la parada lo hubieran tenido igual esperando en cola. Es imprescindible explicarle a los clientes el fenómeno que se trata en esta tesis y sus causas ya que en la mayoría de los casos tienen ideas erróneas sobre el tema, como por ejemplo que los choferes van de a dos para esquivar paradas.

Además se recomienda a los pasajeros que, en primer lugar, si llega a su parada un coche muy lleno luego de un largo tiempo de espera no aborden ese vehículo. Así no contribuyen a su demora y a la demora de todos los pasajeros a bordo. Lo más probable es que atrás venga otro coche más vacío y viajen más rápido y cómodos, contribuyendo a su vez en un mejor funcionamiento de todo el sistema. En segundo lugar se recomienda a los pasajeros que si viajan en un coche bastante lleno mantengan las puertas de ascenso y descenso despejadas para acelerar el viaje. En los colectivos hay poco espacio hasta las máquinas expendedoras de boletos y si ese tramo no está libre se demora mucho más en las paradas (esto se aplicó al modelo).

De todas formas, repetimos que se buscó que las estrategias a estudiar fueran las que menor impacto negativo tuvieran en los clientes, entre otros factores. Lo recién mencionado no se compara con el hecho de tener que cambiar de vehículo en medio del viaje.

La *Figura VI.1* muestra como se buscaron balancear las mejoras en la calidad del servicio ofrecidas por la metodología propuesta, vistas a través de los indicadores presentados en la sección *IV.2.d* y utilizados en la sección *V*; y el impacto negativo que tal propuesta puede tener sobre los sistemas de información de la empresa proveedora del servicio, sobre los costos (se buscó minimizar los costos de implementación de tales mejoras) y los pasajeros.

Figura VI.1 – Contraposición de impactos sobre el sistema

Finalmente, la conclusión principal que se quiere dejar en esta tesis - a la cual se llegó tomando distintas observaciones que fueron surgiendo a lo largo del trabajo – es la siguiente:

Se puede aumentar la estabilidad de una línea de colectivos desde dos flancos:

- la modificación de su estructura (estudiado en la sección *III.3*)
- la aplicación de estrategias de control sobre la marcha

La primera es posible si se está hablando de una línea a diseñar (nueva) o si se afronta una importante inversión, por ejemplo en el caso de que se compren más coches para aumentar la frecuencia de la línea. En caso contrario, las estrategias de control pueden ayudar a incrementar la estabilidad de una línea, que fue en lo que se hizo énfasis en este trabajo.

Si se logra una mayor estabilidad en la línea, por uno u otro camino, esto tendrá un impacto positivo en la recaudación anual – 1.5 MM$ anuales más recaudados - ya que en la sección *III.3.a* pudimos ver que se perdía el 25% de los pasajeros por largas demoras en cola.

Si ese dinero se invierte en nuevos coches para la línea se podrá aumentar la frecuencia de ésta, generándose así un círculo virtuoso también conocido como *loop* reforzador en el cual ahora sí se aplica una modificación estructural en la línea (mayor frecuencia) y se logran una línea más estable, reiniciándose el *loop*. La Figura VI.2 muestra este loop.

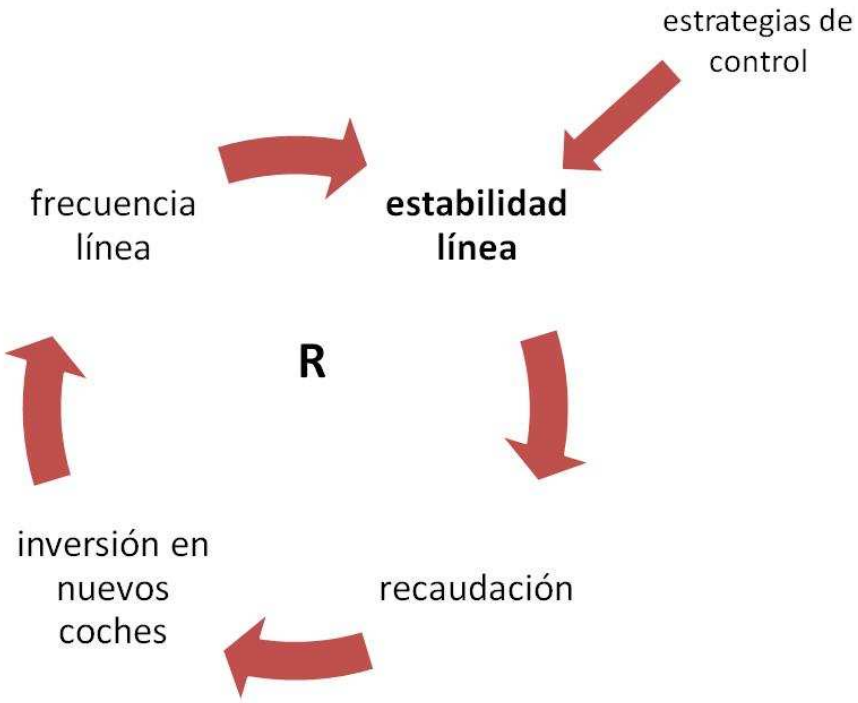

Figura VI.2 – Círculo virtuoso de acciones sobre una línea

VI.1.c – Limitaciones del estudio

De las limitaciones del estudio surgen muchas futuras líneas de investigación, es por eso que esta sección y la próxima estarán altamente relacionadas.

Como se pudo ver, se buscó mantener el estudio lo más conceptual, generalizado y simple posible. Una de las ventajas principales que tiene el

modelo gracias a esto es que con unos pocos datos básicos de una línea de colectivos se puede tener una primera aproximación del grado de inestabilidad de ella y de cómo y cuánto la afectan las distintas estrategias de control. Otra ventaja es que se pueden simular cuantas líneas se desee (no simultáneamente).

Obviamente, el hecho de mantener el estudio en un nivel muy conceptual tiene sus costos. De todas las causas de inestabilidad de una línea de colectivos (vistas en *I.1.a*) sólo se está teniendo en cuenta la relacionada a la llegada de pasajeros a las paradas. La simulación no tiene en cuenta otras particularidades que pueden causar disrupciones en una línea, como el tráfico y las manifestaciones. Esto hace que seguramente las líneas se rompan antes que lo estimado en la sección *III.3* por una suma de efectos de los cuales no se están teniendo en cuenta todos.

Así, la línea D puede que alcance un mayor dFrec a lo largo de un día de operación. De todos modos, para líneas con baja frecuencia como la D el tipo de estrategias planteadas pueden no ser el mejor. Queda por estudiar el efecto de estrategias del tipo *schedule-based* sobre la línea D sobre todo, y también sobre el resto de las líneas para comparar contra los resultados logrados con las estrategias que sí se trataron. Se aclara que esto no fue planteado como indispensable para esta tesis por contar con hallazgos ya hechos por autores anteriores en esta materia, y haber decidido partir de ellos.

VI.2 ♦ FUTURO

Una de las principales futuras líneas de investigación está orientada a un mayor desarrollo del modelo de simulación para darle mayor detalle e incluir en él el resto de los factores que tienen que ver con la inestabilidad de una línea. También se puede seguir aprovechando el modelo para analizar las estrategias tipo *schedule-based* como se dijo en la sección anterior. Con respecto a esta gran rama se plantean los siguientes avances, con el siguiente orden:

- Estudiar estrategias de control basadas en el itinerario de una línea (*schedule-based control strategies*), aplicadas a las cuatro líneas usadas en este trabajo. Comparar y contrastar con las estrategias ya tratadas.
- Agregar otras disrupciones que causan inestabilidad en las líneas de colectivos; como por ejemplo tráfico, manifestaciones, cortes, demoras por semáforos, cruces de trenes, etc.
- Dar más detalle a las líneas. Considerar posibilidad de traspaso entre coches y distancias específicas entre paradas en vez de una distancia promedio entre paradas. También utilizar matrices

específicas de origen-destino de pasajeros y hacer más reales las variaciones de velocidad por tramo y de lambda por parada – que no se hicieron en base a datos reales para cada línea (ver *IV.2.d*).

- Desarrollar red de *pedestrians* para simular pasajeros en base a datos más detallados.
- Ampliar el modelo a toda la red urbana e interurbana de colectivos, línea troncal y alimentadoras secundarias para mejorar el servicio mediante mejores redes y caminos (aumentar frecuencia en troncales y asegurar servicio mínimo en arterias).

Otra línea de investigación futura, igual o más importante que la anterior, tiene que ver con ciertos avances que se avecinan en la industria del transporte público y deberían empezar a ser estudiados y aplicados en el país. Los que se consideran más importantes por el autor son:

- Lo que se conoce como “Transporte inteligente” o “Información para el viajero”. Esto consiste en brindarle mayor información al cliente con respecto a los tiempos de arribo de los próximos servicios, ocupación de los coches próximos, etc.; y se puede hacer por medio de internet, displays en colectivos, displays electrónicos en paradas y terminales. La competencia existente en la Ciudad de Buenos Aires ha causado que no se avance en esta materia, pero vale la pena estudiar posibles aplicaciones ya que la mejora que se puede lograr en la calidad del servicio es considerable.
- Mayor desarrollo de tarjetas integradoras (para mayor información ver [13]) a lo largo de todos los distintos medios de transporte público.
- Avances tecnológicos para acompañar la mejora en el servicio (ver [13]), como por ejemplo logrando reducciones de NOx y CO2.

< VII > BIBLIOGRAFÍA

VII.1 ♦ BIBLIOGRAFÍA GENERAL

[1] Sterman, J. 2000. **Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling in a Complex World.** 1008 páginas. Editorial McGraw-Hill/Irwin. ISBN 9780072389159.

[2] Winston, W. 2004. **Investigación de Operaciones.** 1424 páginas. Editorial Cengage. ISBN: 9706863621.

[3] Banks, J. y otros. 2004. **Discrete-Event System Simulation.** 608 páginas. Editorial Pearson Prentice Hall. ISBN: 9780131446793.

[4] Eco, U. 2001. **Cómo se hace una tesis.** 240 páginas. Editorial Gedisa. ISBN: 9788474328967.

[5] Kelton, W. y otros. 2003. **Simulation with Arena.** 668 páginas. ISBN: 9780072919813.

VII.2 ♦ DOCUMENTOS TÉCNICOS ESPECÍFICOS

[6] Darío Hidalgo. **Comparación de alternativas de transporte público masivo – Una aproximación conceptual.**2005.

[7] Jorge Eduardo Ortiz Triviño, Luz Angela Serrano Rivera. **Simulación de sistemas de transporte público masivo.** Ingeniería e investigación. Vol 26, número 001. Universidad Nacional de Colombia. 2006.

[8] Rueih-Shiarng Chiang, Shaw-Er Wang Chiang. **A System Dynamics Approach to Analyze the Relationship Between Transportation and Regional Development in Taiwan**. National Cheng Kung University, ROC.

[9] James Strathman, Thomas Kimpel, Kenneth Dueker. **Bus Transit Operations Control: Review and an Experiment Involving Tri-Met's Automated Bus Dispatching System.** College of Urban and Public Affairs. Portland State University. 2003

[10] James Strathman, Thomas Kimpel. **Headway Deviation Effects on Bus Passenger Loads: Analysis of Tri-Met's Archived AVL-APC Data**. College of Urban and Public Affairs. Portland State University. 2003.

[11] Carlos Gershenson, Luis Pineda. **Why Does Public Transport Not Arrive on Time? The Pervasiveness of Equal HeadwayInstability.** Universidad Nacional Autónoma de Méjico. 2009.

[12] Manuel D. Rossetti, Timothy Turitto. **Comparing Static and Dynamic Threshold Based Control Strategies**. University of Virginia.

[13] **Bus systems for the future**. International energy agency (IEA) magazine. 2002.

[14] L.G Willimsen, E. Lillo. **Bus Rapid Transport and Urban Development**. 2005.

[15] D. Sáez, C.E. Cortés, M. Riquelme, A. Núñez, A. Tirachini. **Hybrid Predictive Control Strategy for a Public Transport System with Uncertain Demand**. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 2006.

[16] Su Shen. **Integrated Real-Time Sisruption Recovery Strategies: A Model for Rail Transit Systems**. Tsinghua University. 1997.

[17] Ralf Borndorfer, Martin Grotschel, Andreas Lobel. **Optimization of Transport Systems**. ZIB, Berlín. 1998.

[18] David Meignan, Olivier Simonin, Abderrafiaa Koukam. **Simulation and Evaluation of Urban Bus Networks Using a Multiagent Approach**. University of Technology Belfort Montbeliard, France.2007.

VII.3 ♦ OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

[23] http://www.cnrt.gov.ar/infoferro/espanol/data/historia_data.htm. Historia del ferrocarril argentino. Página vigente al 01/02/2010.

[24] http://www.tranvia.org.ar/tranvias/ciudaddebsas.htm. Historia del tranvía en la Ciudad de Buenos Aires. Página vigente al 01/02/2010.

[25] http://www.la-floresta.com.ar/colectivo.htm. Historia de los colectivos de la Ciudad de Buenos Aires. Página vigente al 01/02/2010.

< VIII > ANEXOS

VIII.1 ♦ BRT

BRT (*Bus Rapid Transit*) es el tránsito de alta calidad, orientado al cliente que ofrece una movilidad urbana rápida, cómoda y de bajo costo. Los sistemas BRT tienen algunos o todos los siguientes elementos, muchos de éstos también pueden contribuir a la mejora del servicio regular de colectivos:

- Carriles exclusivos y bien separados físicamente de otros carriles de circulación.
- Modernas paradas de autobús más parecidas a estaciones de trenes, con pre-venta de entradas y confortables áreas de espera.
- Vehículos con varias puertas para permitir el ascenso y descenso rápido de pasajeros.
- Coches largos y de gran capacidad, cómodos, preferentemente con bajo nivel de emisiones.
- Servicios diferenciados, tales como servicios locales y expresos.
- Prioridad en las intersecciones, ya sea por medio de señales de tránsito o por pasos inferiores o superiores (túneles o puentes).
- Sistema integrado de boletos que permite conexiones gratuitas, si es posible a través de distintas líneas de distintas empresas y diferentes modos de transporte (colectivos, trenes, subtes).
- Uso de GPS y otras tecnologías de localización con un área de control central que gestiona la ubicación de los coches en todo momento y facilita la rápida reacción ante problemas.
- Displays de información en tiempo real sobre los tiempos esperados de llegada del colectivo.
- Buen y adecuado acceso a estaciones de taxis, peatones y ciclistas.
- Espacios para estacionar bicicletas.
- Involucra reformas de utilización del suelo para fomentar una mayor densidad cerca de las estaciones BRT.
- Estacionamientos para las estaciones de fuera del núcleo urbano.
- Accesos para discapacitados bien diseñados.
- Excelencia en el servicio al cliente que incluye limpieza, comodidad, seguridad, buena información y personal atento.

VIII.2 ♦ TRENES LIGEROS Y CARRILES DE COLECTIVOS

LRT (*Light Rail Transit*) es un medio de transporte público urbano que generalmente tiene una menor capacidad y velocidad promedio que los sistemas de subtes y trenes convencionales, pero una mayor capacidad y velocidad promedio que los sistemas de tranvías al nivel de la calle. El término "*light*" es usado para referirse a sistemas de trenes con características del estilo "*rapid transit*", en los que los coches son generalmente eléctricos, y las vías no son siempre exclusivas. Este sistema se puede encontrar comúnmente en ciudades europeas, involucra una inversión inicial de 10 a 30 millones de dólares por kilómetro y genera una capacidad de transporte típica de 10 a 20 mil pasajeros por hora-dirección-carril. Por último, cabe recalcar que la velocidad comercial de los coches es de 15 a 25 km/h.

Los carriles de colectivos son simplemente carriles exclusivos destinados al tránsito de colectivos comunes o modificados. Esta estructura revaloriza muchísimo a los sistemas de colectivos, desvinculándolos de los problemas de congestión en el tránsito urbano. Sus mayores aplicaciones se encuentran en Latinoamérica y requieren la ocupación de 2 a 4 carriles de la calle existente. Los sistemas de carriles exclusivos para colectivos requieren de una inversión de 1 a 8 millones de dólares por kilometro. A su vez generan una capacidad de transporte de 15 a 35 miles de pasajeros por hora-dirección-carril y sus coches alcanzan una velocidad comercial similar a la de LRT.

Figura 1 - Mapa completo de metodologías de resolución (elaboración propia)

VIII.3 ♦ ESTRATEGIAS ADAPTATIVAS

El código correspondiente a la estrategia del máximo es el siguiente:

```
if(costomaxmax*(ΔtiemposEsperaProm/Δtadapta)*
(ΔpasajerosColaProm/Δtadapta)>(ΔdemoraPasajerosProm/Δtadapt
a)*(ΔcapacidadUtilProm/Δtadapta)*CapMax*vehiculos)
     {tmax++;
};
if(costominmax*(ΔtiemposEsperaProm/Δtadapta)*
(ΔpasajerosColaProm/Δtadapta)<(ΔdemoraPasajerosProm/Δtadapt
a)*(ΔcapacidadUtilProm/Δtadapta)*CapMax*vehiculos)
     {tmax--;
};
if(tmax<tmaxmin)
     {tmax=tmaxmin;
};
if(tmax>CapMax)
     {tmax=CapMax;
};
```

Por otro lado, las constantes tomadas para estos modelos fueron:

- costomaxmin = 3
- costominmin = 2.9
- costomaxmax= 3.2
- costominmax = 2.7
- tminmin = tmaxmin = 10

VIII.4 ♦ RESULTADOS POR LÍNEA COMPLETOS

Linea	Caso	tTotal Interno	tViaje Interno	tDemora Interno	tTotal Cliente	tViaje Cliente	tDemora Cliente	dCap	dFrec	Pasaj EnCola	PasajFinal EnSist	tEspera	kmHasta Rotura
A	base	4168.95	0.00	716.57	1928.49	0.00	134.74	21.29	408.11	291.82	563.00	1141.43	17.69
A	min 5	3993.97	0.00	541.59	1651.05	0.00	97.53	14.76	235.63	235.42	738.00	907.09	99.18
A	min 10	3942.32	0.00	489.94	898.03	0.00	85.69	6.61	21.77	36.50	238.00	144.89	0.00
A	min 15	4185.39	0.00	733.01	948.21	0.00	127.96	6.57	14.62	38.61	251.00	152.86	0.00
A	min20	4428.23	0.00	975.85	999.77	0.00	170.41	6.74	21.32	40.95	259.00	162.09	0.00
A	max 10	4066.50	0.00	614.12	2043.86	0.00	120.53	19.78	432.48	329.52	766.00	1278.01	24.94
A	max 15	4061.01	0.00	608.63	1839.70	0.00	125.00	21.18	409.16	277.18	770.00	1070.12	19.72
A	max 20	4117.08	0.00	664.70	2035.07	0.00	128.66	21.30	427.17	323.01	686.00	1259.58	17.98
A	max 25	4131.51	0.00	679.13	2006.59	0.00	130.22	21.47	421.19	314.76	663.00	1228.67	17.69
A	mixta 5,10	3975.39	0.00	523.01	1629.32	0.00	94.88	13.33	219.93	231.17	754.00	887.83	117.74
A	mixta 5,15	3991.71	0.00	539.32	1654.91	0.00	97.46	14.68	236.71	236.46	734.00	910.48	93.67
A	mixta 5,20	3992.97	0.00	540.59	1649.68	0.00	97.46	14.71	235.42	235.12	727.00	905.60	99.76
A	mixta 5,25	3993.63	0.00	541.24	1649.49	0.00	97.47	14.76	235.53	234.96	736.00	905.48	99.18
A	mixta 10.15	3942.34	0.00	489.96	898.56	0.00	85.68	6.62	26.64	36.66	238.00	145.43	0.00
A	mixta 10,20	3942.32	0.00	489.94	898.00	0.00	85.68	6.56	21.44	36.49	238.00	144.86	0.00
A	mixta 5,5	3719.06	0.00	266.68	906.60	0.00	47.16	6.59	60.27	47.94	262.00	193.27	188.21
A	mixta 10.10	3942.03	0.00	489.65	897.79	0.00	85.50	5.96	10.91	36.45	237.00	144.80	0.00
A	mixta 15,15	4185.43	0.00	733.05	948.68	0.00	127.98	6.60	22.21	38.72	251.00	153.33	0.00
A	amin 5	4245.07	0.00	792.68	969.85	0.00	145.35	6.51	17.79	39.75	290.00	157.56	0.00
A	amin 10	4382.88	0.00	930.49	993.40	0.00	164.96	6.82	24.25	40.67	233.00	160.90	0.00
A	amin 15	4657.82	0.00	1205.44	1050.41	0.00	212.26	6.90	25.99	43.27	280.00	171.01	0.00
A	amin 20	4656.64	0.00	1204.26	1054.22	0.00	214.28	7.36	35.37	43.62	231.00	172.54	0.00
A	amin 25	4745.45	0.00	1293.07	1068.20	0.00	225.78	7.25	33.30	44.32	264.00	175.15	0.00
A	amixta 5,10	4389.09	0.00	936.71	993.65	0.00	164.26	6.87	27.45	41.00	258.00	162.21	0.00
A	amixta 10,15	4530.61	0.00	1078.23	1023.41	0.00	189.96	6.78	23.90	42.01	250.00	166.09	0.00
A	amixta 10,10	4121.87	0.00	644.65	936.89	0.00	112.92	6.72	23.93	38.27	249.00	151.84	0.00
A	amixta 10,20	4487.82	0.00	1010.61	1014.59	0.00	177.94	6.91	23.71	41.57	265.00	164.60	0.00
A	amixta 15,20	4657.82	0.00	1205.44	1050.41	0.00	212.26	6.90	25.99	43.27	280.00	171.01	0.00
A	umbrale 375	4872.66	0.00	1420.28	1094.56	0.00	246.92	6.77	34.21	45.76	284.00	180.64	0.29
A	umbrale 246.6	3892.35	0.00	439.97	922.47	0.00	77.38	11.12	105.43	45.14	252.00	178.12	45.53
A	umbrale 300	4071.29	0.00	618.91	924.56	0.00	107.80	6.52	12.75	37.65	241.00	149.28	0.00
A	umbrale 275	3809.19	0.00	356.80	869.76	0.00	62.26	6.34	10.01	35.28	226.00	139.84	0.00
A	umbrale 225	4251.84	0.00	799.46	1175.86	0.00	142.30	17.89	252.13	94.41	327.00	369.26	28.13
A	umbrald 246.6	3853.67	0.00	401.29	880.28	0.00	69.65	6.31	15.06	36.03	230.00	143.01	0.00
A	doble	3700.02	0.00	247.64	847.52	0.00	43.20	6.22	9.50	34.43	220.00	136.60	0.00

Linea	Caso	tTotal Interno	tViaje Interno	tDemora Interno	tTotal Cliente	tViaje Cliente	tDemora Cliente	dCap	dFrec	Pasaj EnCola	PasajFinal EnSist	tEspera	kmHasta Rotura
B	base	12625.06	0.00	1125.06	2051.07	0.00	110.24	19.19	329.48	493.12	1645.00	956.47	48.50
B	min 5	12121.91	0.00	621.91	1415.11	0.00	60.53	12.90	90.56	164.33	1040.00	350.66	176.50
B	min 10	12564.17	0.00	1064.17	1347.03	0.00	89.61	11.20	32.00	100.40	654.00	244.10	0.00
B	min 15	13083.92	0.00	1583.92	1396.51	0.00	131.50	11.21	25.85	104.53	675.00	251.73	0.00
B	min 20	13601.75	0.00	2101.75	1447.67	0.00	173.89	11.27	27.37	108.41	716.00	260.62	0.00
B	max 10	12467.41	0.00	967.41	1918.82	0.00	96.73	18.42	306.59	424.45	1454.00	833.63	57.00
B	mixta 5,10	12106.26	0.00	606.26	1394.83	0.00	58.30	11.78	76.18	152.59	998.00	332.03	203.50
B	mixta 5,15	12116.36	0.00	616.36	1412.35	0.00	60.05	12.57	87.68	163.02	1040.00	348.46	180.50
B	mixta 5,20	12117.47	0.00	617.47	1412.61	0.00	60.19	12.75	89.19	163.14	1040.00	348.38	178.50
B	mixta 10,15	12563.35	0.00	1063.35	1346.66	0.00	89.41	10.88	27.22	100.37	654.00	243.99	0.00
B	mixta 15,20	13083.58	0.00	1583.58	1396.53	0.00	131.41	11.12	23.83	104.49	675.00	251.76	0.00
B	mixta 20,25	13601.65	0.00	2101.65	1448.02	0.00	173.85	11.24	27.66	108.04	716.00	260.99	0.00
B	mixta 5,5	12074.17	0.00	574.17	1418.24	0.00	49.35	8.48	36.82	137.37	669.00	353.16	283.00
B	mixta 10,10	12561.38	0.00	1061.38	1346.92	0.00	88.88	10.38	24.20	100.48	652.00	245.05	0.00
B	mixta 15,15	13082.82	0.00	1582.82	1396.28	0.00	131.24	10.94	22.99	104.63	676.00	251.83	0.00
B	amin 5	13932.78	0.00	2432.78	1481.84	0.00	203.73	11.37	36.17	111.92	738.00	265.22	0.00
B	amin 10	13932.78	0.00	2432.78	1481.84	0.00	203.73	11.37	36.17	111.92	738.00	265.22	0.00
B	amin 15	13908.19	0.00	2408.19	1471.28	0.00	194.79	11.30	31.56	110.76	690.00	263.28	0.00
B	amin 20	13446.61	0.00	1946.61	1430.22	0.00	159.20	11.31	30.06	108.04	694.00	257.78	0.00
B	amixta 5,10	12741.06	0.00	1241.06	1367.25	0.00	106.25	10.64	24.94	102.21	664.00	247.85	0.00
B	amixta 10,10	12741.06	0.00	1241.06	1367.25	0.00	106.25	10.64	24.94	102.21	664.00	247.85	0.00
B	amixta 10,15	12791.29	0.00	1291.29	1368.03	0.00	107.55	10.98	28.17	102.19	659.00	247.14	0.00
B	amixta 15,20	13035.98	0.00	1535.98	1390.64	0.00	125.99	11.13	26.42	104.23	659.00	251.32	0.00
B	umbrale 302	12582.62	0.00	1082.62	1470.91	0.00	97.81	13.18	104.01	168.09	870.00	365.27	176.00
B	umbrale 325	12281.02	0.00	781.02	1321.28	0.00	66.30	11.02	18.01	98.85	631.00	241.44	0.00
B	umbrale 350	12860.43	0.00	1360.43	1377.63	0.00	113.86	11.11	14.72	103.86	663.00	250.37	0.00
B	umbrale 400	14176.15	0.00	2676.15	1505.03	0.00	217.86	11.35	34.84	116.68	727.00	274.15	1.50
B	umbrale 275	12737.22	0.00	1237.22	1551.08	0.00	108.43	15.27	156.80	210.76	1011.00	439.02	84.50
B	umbrald 302	12801.78	0.00	1301.78	1370.61	0.00	107.81	11.07	20.26	103.44	667.00	249.44	0.00
B	umbrale 332	12434.99	0.00	934.99	1335.61	0.00	78.89	11.02	15.76	99.64	626.00	243.32	0.00
B	doble	12079.23	0.00	579.23	1301.69	0.00	50.97	10.88	17.28	96.84	619.00	237.19	0.00

Linea	Caso	tTotal Interno	tViaje Interno	tDemora Interno	tTotal Cliente	tViaje Cliente	tDemora Cliente	dCap	dFrec	Pasaj EnCola	PasajFinal EnSist	tEspera	kmHasta Rotura
C	base	15310.29	0.00	351.85	1255.12	0.00	25.09	7.18	129.94	86.84	371.00	374.10	38.10
C	min 5	15773.15	0.00	814.70	1205.06	0.00	46.43	6.61	46.88	66.82	281.00	297.65	0.00
C	min 10	16557.49	0.00	1599.04	1258.67	0.00	87.98	6.60	32.01	70.03	298.00	310.12	0.00
C	min 15	17338.28	0.00	2379.84	1315.32	0.00	130.22	6.69	31.06	73.71	310.00	324.62	0.00
C	min 20	18109.31	0.00	3150.86	1371.66	0.00	172.57	6.77	33.61	77.38	324.00	338.94	0.00
C	mixta 5,10	15772.26	0.00	813.81	1204.05	0.00	46.10	6.30	29.94	66.49	281.00	295.47	0.00
C	mixta 5,15	15773.06	0.00	814.61	1205.38	0.00	46.39	6.54	45.28	66.79	281.00	296.72	0.00
C	mixta 5,20	15773.15	0.00	814.71	1205.10	0.00	46.43	6.60	46.11	66.77	281.00	297.17	0.00
C	mixta 10,15	16557.39	0.00	1598.94	1259.18	0.00	87.93	6.53	30.29	70.07	298.00	309.43	0.00
C	mixta 10,20	16557.54	0.00	1599.09	1258.89	0.00	87.99	6.59	32.07	70.03	298.00	309.81	0.00
C	mixta 15,20	17338.20	0.00	2379.76	1315.28	0.00	130.19	6.68	29.22	73.66	310.00	324.12	0.00
C	mixta 5,5	15770.76	0.00	812.31	1245.88	0.00	45.45	5.42	10.84	69.82	279.00	336.15	0.00
C	mixta 10,10	16556.55	0.00	1598.11	1258.66	0.00	87.66	6.34	21.17	69.96	298.00	308.95	0.00
C	mixta 15,15	17337.97	0.00	2379.52	1315.51	0.00	130.10	6.61	25.81	73.70	311.00	323.71	0.00
C	amin 5	16701.07	0.00	1742.62	1271.05	0.00	97.19	6.61	31.49	70.83	296.00	313.25	0.00
C	amin 10	16701.07	0.00	1742.62	1271.05	0.00	97.19	6.61	31.49	70.83	296.00	313.25	0.00
C	amin 15	16701.07	0.00	1742.62	1271.05	0.00	97.19	6.61	31.49	70.83	296.00	313.25	0.00
C	amin 20	16701.07	0.00	1742.62	1271.05	0.00	97.19	6.61	31.49	70.83	296.00	313.25	0.00
C	amixta 5,10	16687.81	0.00	1729.36	1267.57	0.00	94.67	6.43	23.87	70.62	289.00	310.64	0.00
C	amixta 10,10	16687.81	0.00	1729.36	1267.57	0.00	94.67	6.43	23.87	70.62	289.00	310.64	0.00
C	amixta 10,15	16687.81	0.00	1729.36	1267.57	0.00	94.67	6.43	23.87	70.62	289.00	310.64	0.00
C	amixta 15,20	16712.49	0.00	1754.04	1268.99	0.00	95.82	6.42	21.72	70.53	290.00	311.22	0.00
C	umbrale 482	15394.40	0.00	435.95	1178.79	0.00	26.44	6.52	40.77	65.29	269.00	291.57	0.00
C	umbrale 450	15346.05	0.00	387.60	1176.67	0.00	23.79	6.59	52.79	65.42	273.00	292.15	172.80
C	umbrale 500	15519.69	0.00	561.24	1184.33	0.00	32.41	6.49	23.00	65.13	274.00	291.22	0.00
C	umbrale 525	16035.24	0.00	1076.79	1222.18	0.00	60.32	6.53	14.84	67.81	279.00	301.37	0.00
C	umbrale 550	16607.45	0.00	1649.00	1263.82	0.00	90.87	6.61	16.76	70.63	292.00	312.46	0.00
C	umbrald 480	16789.91	0.00	1831.46	1276.31	0.00	99.52	6.60	29.42	71.60	287.00	316.44	0.00
C	umbrale 580	17300.13	0.00	2341.68	1314.32	0.00	128.02	6.68	24.27	74.16	299.00	326.21	0.00
C	doble	15547.25	0.00	588.80	1186.69	0.00	33.98	6.49	16.41	65.38	264.00	291.94	0.00
C	combinada	16561.86	0.00	1603.41	1258.78	0.00	88.24	6.45	19.60	70.01	300.00	310.03	0.00

Linea	Caso	tTotal Interno	tViaje Interno	tDemora Interno	tTotal Cliente	tViaje Cliente	tDemora Cliente	dCap	dFrec	Pasaj EnCola	PasajFinal EnSist	tEspera	kmHasta Rotura
D	base	8177.03	0.00	68.93	1310.04	0.00	16.69	4.57	19.76	9.52	0.00	416.23	0.00
D	min 4	8451.91	0.00	343.80	1341.50	0.00	38.79	4.55	5.19	9.74	0.00	425.88	0.00
D	min 5	8536.79	0.00	428.68	1360.06	0.00	47.27	4.56	5.94	9.98	0.00	436.29	0.00
D	min 10	8961.60	0.00	853.49	1418.29	0.00	90.08	4.63	11.72	10.37	0.00	452.19	0.00
D	mixta 5,10	8536.79	0.00	428.68	1360.06	0.00	47.27	4.56	5.94	9.98	0.00	436.29	0.00
D	mixta 4,6	8451.91	0.00	343.80	1341.50	0.00	38.79	4.55	5.19	9.74	0.00	425.88	0.00
D	mixta 4,4	8451.91	0.00	343.80	1341.50	0.00	38.79	4.55	5.19	9.74	0.00	425.88	0.00
D	mixta 3,3	8369.45	0.00	261.34	1339.74	0.00	30.76	4.44	4.30	9.88	0.00	432.11	0.00
D	amin 2	9457.44	0.00	1349.33	1490.16	0.00	135.66	4.68	27.59	10.99	0.00	479.30	0.00
D	amixta 0,6	9457.44	0.00	1349.33	1490.16	0.00	135.66	4.68	27.59	10.99	0.00	479.30	0.00
D	umbrale 840	8370.62	0.00	262.51	1337.61	0.00	30.85	4.49	4.44	9.84	0.00	430.06	0.00
D	umbrale 815	8202.15	0.00	94.04	1308.30	0.00	17.23	4.53	6.32	9.45	0.00	413.87	0.00
D	umbrale 865	8585.94	0.00	477.83	1367.94	0.00	52.19	4.60	9.44	10.07	0.00	439.34	0.00
D	umbrale 900	8938.08	0.00	829.97	1420.99	0.00	87.08	4.64	21.05	10.50	0.00	458.07	0.00
D	umbrald 840	9580.22	0.00	1472.11	1504.61	0.00	145.50	4.73	46.14	11.09	1.00	484.39	0.80
D	doble	8274.60	0.00	166.49	1327.63	0.00	25.50	4.52	7.33	9.72	0.00	425.29	0.00