



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“EXTENSIÓN DEL SOFTWARE PASSION XLS Y SU APLICACIÓN A LA
MODELACIÓN DE LA CIRCULACIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO ENTRE
DOS PARADEROS CONSECUTIVOS.”**

**KEVIN RICARDO FERNÁNDEZ SOTO
- 2021 -**



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“EXTENSIÓN DEL SOFTWARE PASSION XLS Y SU APLICACIÓN A LA
MODELACIÓN DE LA CIRCULACIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO ENTRE
DOS PARADEROS CONSECUTIVOS.”**

**INFORME DE ACTIVIDAD DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**PROFESOR GUÍA: MAXIMILIANO LIZANA MALDONADO
PROFESOR CO-GUÍA: RODRIGO FERNÁNDEZ AGUILERA**

**KEVIN RICARDO FERNÁNDEZ SOTO
- 2021 -**

**“EXTENSIÓN DEL SOFTWARE PASSION XLS Y SU APLICACIÓN A LA
MODELACIÓN DE LA CIRCULACIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO ENTRE
DOS PARADEROS CONSECUTIVOS.”**

KEVIN RICARDO FERNÁNDEZ SOTO

COMISIÓN EXAMINADORA

MAXIMILIANO LIZANA

Profesor Guía

RODRIGO FERNÁNDEZ

Profesor Co-Guía

LORENA ORTIZ

Académico Evaluador

Calificación trabajo escrito :

Calificación examen :

Calificación final :

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar, agradezco enormemente a mi madre y abuelos por guiarme y darme las herramientas necesarias para afrontar todos los desafíos para llegar hasta esta instancia.

Agradezco a mi profesor Maximiliano Lizana por su siempre rápida y buena voluntad para ayudar con las dudas durante el trabajo. Al profesor Rodrigo Fernández por entregarme conocimientos muy valiosos. A la profesora Lorena Ortiz por su sentido práctico y crítico para mejorar el trabajo.

A mi amigo Jose, por resolver mis inquietudes respecto a la programación y a mis amigos Carlos, Rodrigo y Felipe por siempre entregar su apoyo moral para llevar a buen término este trabajo.

RESUMEN.

El transporte público es uno de los principales modos usados por las personas para movilizarse en nuestro país, siendo el paradero de bus el primer punto de contacto entre pasajeros y transporte público. Los paraderos se encuentran distribuidos en las ciudades y son uno de los motivos más relevantes de detención de los buses. En este sentido para una ruta dada desde un punto "A" hasta un punto "B" la principal diferencia entre el transporte privado y público es que este último debe pasar continuamente a realizar transferencias de pasajeros en los paraderos. Esto implica que el estudio de las interacciones que se dan en los paraderos se posiciona como un elemento clave para el buen funcionamiento del sistema de transporte público.

Actualmente la mayoría de los softwares de modelación de transporte público consideran los paraderos como un elemento secundario, mientras que otros como PASSION XLS lo hacen en detalle, pero solamente modelando un paradero. Versiones posteriores del software como SESSION, desarrollado en base a PASSION XLS permite modelar dos paraderos seguidos, pero aún tiene ciertas limitaciones como el hecho de que no es posible diferenciar la demanda de pasajeros entre el primer y segundo paradero, ni modelar buses que se detienen en el primer paradero, pero no en el segundo. A su vez no es posible modelar paraderos separados por un semáforo en el que alguno de los dos se encuentre a una cierta distancia del semáforo en el sentido del flujo de circulación. Estas limitaciones constituyen un problema al dejar fuera de los marcos de simulación todas estos escenarios y por ende la posibilidad de evaluar y optimizar el funcionamiento de los paraderos de buses para estas circunstancias. Ante esto se desarrolla en esta memoria PASSION K una versión de mayores capacidades.

Las principales mejoras mediante la extensión de PASSION XLS y el nacimiento de PASSION K, son la habilitación de la posibilidad de simular hasta dos paraderos continuos separados cierta distancia. Esta extensión permite diferenciar completamente la demanda de pasajeros de cada paradero. A su vez de incorporar algoritmos que son capaces de trabajar con buses que pasan al primer paradero y no al segundo o viceversa. También se realizaron modificaciones importantes a la modelación del funcionamiento del semáforo para mejorar los resultados.

PASSION K fue validado con cuatro sets de datos medidos en la ciudad de Temuco, donde en general el flujo de buses y peatones fue baja. Esta situación tiene una estrecha relación al contexto de pandemia por Covid 19 en el cual se tomaron estos datos. Sin embargo, a pesar de esto los resultados fueron muy satisfactorios en cuanto al buen ajuste que logra el nuevo modelo, superando de manera clara a versiones previas como SESSION. Por último, se llevaron a cabo tres casos experimentales del funcionamiento del transporte público, de los dos primeros se desprende que los ciclos mayores de los semáforos afectan negativamente los tiempos de detención de los buses en los paraderos. Mientras que mediante el tercer experimento se deja en evidencia la considerable influencia positiva sobre la capacidad del paradero, cuando el semáforo no se encuentra limitando la salida de los buses del paradero. Adicionalmente se constató la baja influencia en términos de tiempo utilizado para desplazarse entre paraderos con estas modificaciones.

Índice de Contenidos

Capítulo 1.	Introducción.....	1
1.1	Descripción del problema.....	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo General.....	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
Capítulo 2.	Antecedentes generales.....	4
2.1	Modelos de simulación de transporte público.	4
2.1.1	Modelos de simulación microscópicos.....	5
2.1.2	Modelación de paraderos de transporte público.	8
2.2	Modelación en PASSION	12
2.3	Versiones anteriores de PASSION.....	20
2.3.1	PASSION, Versión 4.2.....	20
2.3.2	PASSION, Versión 5.0.....	22
2.3.3	PASSION XLS	24
2.3.4	SESSION.....	28
Capítulo 3.	Desarrollo de PASSION K.....	31
3.1	Descripción General.....	31
3.2	Marco de simulación	32
3.3	Plataforma de programación.	33
3.4	Descripción analítica	34
3.5	Funcionamiento de PASSION K	36
3.5.1	Parámetros del paradero y simulación.	37
3.5.2	Módulo de buses.	38
3.5.3	Módulo de salida.....	41
3.5.4	Módulo de pasajeros	41

3.5.5	Entrega de resultados.....	42
Capítulo 4.	Resultados y discusión.....	48
4.1	Validación.....	48
4.1.1	Diego Portales con General Pedro Lagos: Set de datos 1.	50
4.1.2	Diego Portales con General Pedro Lagos: Set de datos 2.	57
4.1.3	Diego Portales con General Pedro Lagos: Set de datos 3.	63
4.1.4	Avenida Alemania con Dinamarca: Set de datos 4.....	69
4.2	Experimentación.....	74
4.2.1	Experimento 1.....	74
4.2.2	Experimento 2.....	76
4.2.3	Experimento 3.....	78
Capítulo 5.	Conclusiones.....	81
NOMENCLATURA.		84
Bibliografía		88
ANEXOS		90
A.	Anexos digitales	90
A.1	Base de datos.....	90
A.2	Link descarga PASSION K y video de inicio rápido.....	90
B.	Anexos de módulos del primer set de datos.....	91
B.1	Módulo de buses paradero uno, set uno.....	91
B.2	Módulo de pasajeros paradero uno, set uno.....	92
B.3	Módulo de pasajeros paradero dos, set uno.....	93
C.	Anexos de módulos del segundo set de datos.....	94
C.1	Módulo de buses paradero uno, set dos.....	94
C.2	Módulo de pasajeros paradero uno, set dos.....	95
C.3	Módulo de pasajeros paradero dos, set dos.....	96

D. Anexos de módulos del tercer set de datos	97
D.1 Módulo de buses paradero uno, set tres.	97
D.2 Módulo de pasajeros paradero uno, set tres.	98
D.3 Módulo de pasajeros paradero dos, set tres.....	99
E. Anexos de módulos del cuarto set de datos.....	100
E.1 Módulo de buses paradero uno, set cuatro.....	100
E.2 Módulo de pasajeros paradero uno, set cuatro.....	100
E.3 Módulo de pasajeros paradero dos, set cuatro.....	101

Índice de tablas.

Tabla 2.1. Eficiencia de los paraderos según el número de sitios de detención.	11
Tabla 4.1. Información General usada para simular el primer set de datos.	50
Tabla 4.2. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de permanencia para del paradero uno, set de datos 1.....	51
Tabla 4.3. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de salida del paradero uno, set de datos 1.....	54
Tabla 4.4. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de llegada del paradero dos, set de datos 1.....	56
Tabla 4.5. Información General usada para simular el segundo set de datos.....	57
Tabla 4.6. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de permanencia para del paradero uno, set de datos 2.....	58
Tabla 4.7. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de salida del paradero uno, set de datos 2.....	60
Tabla 4.8. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de llegada del paradero dos, set de datos 2.....	62
Tabla 4.9. Información General usada para simular el tercer set de datos.	63
Tabla 4.10. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de permanencia para del paradero uno, set de datos 3.....	64
Tabla 4.11. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de salida del paradero uno, set de datos 3.....	67
Tabla 4.12. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de llegada del paradero dos, set de datos 3.....	69
Tabla 4.13. Información General usada para simular el cuarto set de datos.	69
Tabla 4.14. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de permanencia para del paradero uno, set de datos 4.....	71
Tabla 4.15. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de salida del paradero uno, set de datos 4.....	72
Tabla 4.16. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de llegada del paradero dos, set de datos 4.....	74
Tabla 4.17. Parámetros para las simulaciones del experimento 1.	75
Tabla 4.18. Parámetros para las simulaciones del experimento 3.	78

Índice de figuras.

Figura 2.1. Modelo conceptual de la modelación de PASSION. Adaptado de (Fernández, 2001)	12
Figura 2.2. Archivo de entrada tipo de PASSION. (Fernández, 2001)	15
Figura 2.3. Interfaz de PASSION versión 4.2.	21
Figura 2.4. Archivo de salida tipo de PASSION 4.2	22
Figura 2.5. Interfaz de PASSION 5.0. (Fernández y Moreno, 2005)	23
Figura 2.6. Interfaz PASSION XLS.....	25
Figura 2.7. Ejemplo Módulo buses PASSION XLS.	27
Figura 2.8. Ejemplo de estadísticas generales PASSION XLS.	28
Figura 2.9. Interfaz de SESSION	29
Figura 2.10. Ejemplo de resultados generales SESSION.	30
Figura 3.1. Escenario tipo modelado por PASSION K.	33
Figura 3.2. Interfaz de PASSION K.	36
Figura 3.3. Formulario de parámetros generales de PASSION K.	37
Figura 3.4. Ejemplo del módulo de buses de PASSION K.	39
Figura 3.5. Ejemplo del módulo de pasajeros de PASSION K.	42
Figura 3.6. Resultados ofrecidos por PASSION K.	43
Figura 3.7. Ejemplo de resultados específicos de los buses de PASSION K.....	45
Figura 3.8. Ejemplo de resultados específicos para los pasajeros de PASSION K.....	46
Figura 4.1. ubicación geográfica de los pares de paraderos utilizados para la validación, Temuco.	49
Figura 4.2. Comparación de tiempos de permanencia del paradero uno, set de datos 1.	51
Figura 4.3. Comparación en los tiempos de salida del paradero uno por bus para el set de datos 1.....	53
Figura 4.4. Diferencias en los tiempos de salida con lo medido, del paradero uno para el set de datos 1.....	53
Figura 4.5. Comparación en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 1.	55
Figura 4.6. Diferencias en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 1.	55

Figura 4.7. Comparación de tiempos de permanencia del paradero uno, set de datos 2.	58
Figura 4.8. Comparación en los tiempos de salida del paradero uno por bus para el set de datos 2.....	59
Figura 4.9. Diferencias en los tiempos de salida con lo medido, del paradero uno para el set de datos 2.....	60
Figura 4.10. Comparación en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 2.....	61
Figura 4.11. Diferencias en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 2.	62
Figura 4.12. Comparación de tiempos de permanencia del paradero uno, set de datos 3.	64
Figura 4.13. Comparación en los tiempos de salida del paradero uno por bus para el set de datos 3.....	65
Figura 4.14. Diferencias en los tiempos de salida con lo medido, del paradero uno para el set de datos 3.	66
Figura 4.15. Comparación en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 3.....	67
Figura 4.16. Diferencias en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 3.	68
Figura 4.17. Comparación de tiempos de permanencia del paradero uno, set de datos 4.	70
Figura 4.18. Comparación en los tiempos de salida del paradero uno por bus para el set de datos 4.....	71
Figura 4.19. Diferencias en los tiempos de salida con lo medido, del paradero uno para el set de datos 4.	72
Figura 4.20. Comparación en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 4.....	73
Figura 4.21. Diferencias en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 4.	73
Figura 4.22. Tiempos de permanencia promedio para las tres distribuciones disponibles y su variación con el ciclo del semáforo.	76

Figura 4.23. Tiempos de permanencia promedio para los tres primeros sets de datos disponibles y su variación con el ciclo del semáforo.	77
Figura 4.24. Capacidad del paradero según la distancia del paradero al semáforo.....	79
Figura 4.25. Variación del tiempo promedio de llegada por bus, respecto a una distancia de 0 [m].	80

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se abarcan las principales ideas que dan origen y forma al desarrollo del presente trabajo, contextualizando respecto al transporte público de Temuco, la importancia de los paraderos, como son estos modelados y la problemática que se busca solucionar. Al final de este capítulo se plantearán los objetivos, mediante los cuales se busca abordar las ideas planteadas.

1.1 Descripción del problema

Actualmente según los datos (SECTRA, 2014), durante un día típico laboral en Temuco se realizan 1 millón de viajes, de estos el 74% son motorizados. De los viajes motorizados el transporte público abarca el 48.15% donde el modo más usado con diferencia es el bus con un 75%. Se establece además que el transporte público predomina en la mayoría de las macrozonas de Temuco, con excepción de Centro Poniente, una macrozona mayoritariamente de altos ingresos, donde el transporte privado duplica el uso de transporte público. Los tiempos de viaje en transporte público son en promedio de 31 min vs 23 min del transporte privado. La realidad de Temuco constituye una situación no muy distinta al resto del país en cuanto a la importancia de los buses dentro del transporte público. En este sentido la mejora del transporte público de buses se constituye como un medio que no solamente permite descongestionar las vías cada vez más solicitadas por el ingente incremento de vehículos privados, sino también como una forma de lograr una mayor equidad social dentro de nuestras ciudades.

En el transporte público de buses el paradero de buses es el primer punto de contacto entre los pasajeros y el servicio del transporte público de buses. Para mejorar la calidad de los servicios de buses, el paradero se posiciona como un elemento crucial. Estos deben proporcionar la infraestructura necesaria para subir y bajar los pasajeros de forma segura. La accesibilidad y ubicación del paradero influye significativamente en el rendimiento del sistema de transporte público y la satisfacción del cliente. Esta ubicación está relacionada principalmente con el rendimiento operativo de la ruta del bus y el tráfico, pero también puede verse influenciada por los usos del suelo adyacente. El diseño de los paraderos ha de permitir un flujo seguro y fluido de buses y pasajeros.

Con los años se han desarrollado diversos softwares de simulación de transporte público, con el fin de optimizar el funcionamiento del sistema, como por ejemplo VISSIM y Transmodeler, que abarcan la simulación de paraderos del transporte público. Sin embargo, estos últimos son más bien un complemento dentro de estos programas y no son abarcados como un objetivo principal de estudio. A la par de estos softwares mencionados anteriormente se han creado otros como IRENE (Gibson *et al.*, 1989) y PASSION (Fernández, 2001). Estos se centran en toda la interacción que se produce en los paraderos. Modelan diversos escenarios de forma microscópica, simulando y haciendo un seguimiento detallado de cada bus, pasajero y el tráfico cercano.

PASSION en particular ha sido un programa con un desarrollo constante desde su creación el año 2001. Se han creado diversas versiones, cada una de estas ha ido incorporando nuevas funciones para mejorar el software. Las últimas versiones llamadas PASSION XLS y SESSION, se han creado en Visual Basic for Applications de Excel, permitiendo realizar simulaciones en una plataforma más amigable y común para las personas. Facilitando así el trabajo mediante hojas de cálculo de los resultados, pero aun manteniendo ciertas limitaciones en la simulación.

Actualmente PASSION XLS solamente puede abarcar la interacción de un solo paradero. SESSION por su parte permite modelar dos paraderos seguidos, pero no es posible diferenciar la demanda de pasajeros entre el primer y segundo paradero, ni modelar buses que paran en el primer paradero, pero no en el dos. A su vez no es posible modelar paraderos separados por un semáforo en donde alguno de los dos se encuentre a una cierta distancia del semáforo en el sentido del flujo de circulación. Estas limitaciones constituyen un problema al dejar fuera de los marcos de simulación todas estos escenarios y por ende la posibilidad de evaluar y optimizar el funcionamiento de los paraderos de buses para estas circunstancias.

1.2 Objetivos

Con el fin de mejorar la problemática planteada se plantean los siguientes objetivos.

1.2.1 Objetivo General

- “Extender las capacidades del software PASSION XLS para modelar dos paradas de buses consecutivas separadas por un semáforo”.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo propuesto se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Incorporar módulos de demanda de pasajeros en cada parada.
- Separar la modelación de los buses que interactúan en cada parada.
- Reformular el efecto del semáforo dentro de la modelación.
- Validar el software con datos reales y simular escenarios de funcionamiento del transporte público en Temuco.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES GENERALES

Capítulo 2. Antecedentes generales

Este capítulo abarca una revisión de diversos modelos de simulación de transporte público, enfocados en los paraderos de buses. Todos estos modelos se han construido sobre simplificaciones de las operaciones que se dan en los paraderos. Estas simplificaciones toman forma de suposiciones sobre la llegada de los pasajeros, los tiempos de permanencia, etc.

La segunda parte del capítulo está centrada en la moderación desarrollada por PASSION, su funcionamiento y las principales versiones de PASSION afines al trabajo desarrollado.

2.1 Modelos de simulación de transporte público.

Existen múltiples tipos de modelos de transporte público, habiendo tres tipos de enfoques principales para la simulación según el tipo de estudio que se esté llevando a cabo, estos pueden ser;

- Modelos macroscópicos: Este tipo de modelos trabajan a la mayor escala en comparación a los otros tipos. No se realiza un seguimiento detallado de cada vehículo por sí solo, sino más bien uno del conjunto. Se introducen solo las características generales del transporte público como lo son; la velocidad, el flujo, capacidades, etc.
- Modelos de pelotón: Los modelos de pelotón se encuentran en un punto medio entre los modelos macroscópicos y microscópicos, mezclando conceptos y herramientas con el fin de analizar el comportamiento de los vehículos.
- Modelos microscópicos: Estos modelos, trabajan con la menor escala para estudiar los distintos sistemas de tránsito. Se enfocan en realizar un seguimiento del comportamiento de cada vehículo en el sistema y como estos interactúan con la infraestructura y los demás vehículos presentes en ella.

Un aspecto importante en la operación de buses del transporte público, es ser capaz de calcular la cantidad de tiempo que los buses se encuentran detenidos en los paraderos. Siendo esta la principal diferencia que existe en el trayecto de un bus frente a un vehículo particular. De acuerdo con (Lobo, 1997), los paraderos son el principal cuello de botella,

a pesar de esto, muchos modelos no son rigurosos en la interacción que se produce en los paraderos y sus demoras asociadas.

Durante la siguiente sección se explicarán con mayor detalle diferentes modelos de simulación, poniendo énfasis en el software PASSION, el cual es el modelo base de trabajo de la siguiente memoria.

2.1.1 Modelos de simulación microscópicos.

VISSIM

VISSIM es un software para la simulación de tránsito, utiliza la modelación microscópica y multimodal. Es capaz de trabajar con transporte público, tráfico automovilístico y de peatones (VISSIM, 2021).

VISSIM permite simulaciones a diferentes niveles. Por ejemplo, de forma microscópica entrega el nivel más alto de detalle, debido a que los elementos dentro de la simulación son trabajados individualmente. Sin embargo, de ser necesario también se entrega alternativa hacia una versión híbrida que combina la microsimulación con la simulación mesoscópica.

Respecto al transporte público, el modelo presentado por VISSIM posee un módulo de buses que permite generar llegadas y características de los buses. Múltiples patrones de llegadas pueden ser reproducidos como, por ejemplo; los intervalos regulares o aleatorios según diversas distribuciones, llegadas programadas, combinación de líneas de diferentes frecuencias, llegadas en pelotón o a partir de datos reales de campo (Kumararaja y Karuppanan, 2016). Algunos de estos patrones se pueden generar mediante distribuciones estadísticas o ingresar directamente como archivos de entrada. En este módulo también se ingresan otras características como lo son el número de la ruta, la cantidad de pasajeros que bajan del bus, el tiempo medio de bajada por pasajero, la capacidad disponible de cada bus al llegar al paradero y el tiempo de bloqueo asociado a demoras extras para salir de la zona de parada.

El módulo de pasajeros del modelo comparte similitudes con el módulo de buses. Es decir, múltiples patrones de llegada pueden ser generados o ingresados directamente por el usuario mediante sus propios archivos. Otros datos disponibles para especificar en

este módulo son la ruta del pasajero y el tiempo que tarda en subir al bus una vez este se encuentra en el paradero.

VISSIM tiene múltiples características operativas y de diseño, entre las cuales se pueden mencionar:

- Diseño del área de parada: número de sitios de detención, existencia de parada obligatoria o solicitada, disciplinas FIFO y OA.
- Las llegadas de los buses pueden ser según intervalos fijos o mediante distribuciones.
- Las detenciones se pueden realizar en cualquier sitio de detención. En el sitio de detención más próximo a la salida los buses solamente pueden detenerse para subir, bajar pasajeros o ambas operaciones.

VISSIM tiene dos métodos de cálculo de tiempo de espera en el paradero. 1) Distribuciones de tiempo, este asigna los tiempos de espera mediante distribuciones que tienen que ser definidas por el usuario. 2) Modelo avanzado de pasajeros, este determina el tiempo de espera en base al número de pasajeros que descienden y ascienden permitiendo los procesos de subida y bajada de forma paralela o secuencial y sumando el tiempo de despeje como la cantidad de tiempo utilizada para que el bus se detenga y abra y cierre sus puertas. Este último método también asigna un porcentaje de los pasajeros que lleva el bus de la línea que descienden. Esto implica un porcentaje fijo de pasajeros que bajan para todos los buses de la misma línea que se detienen en el paradero. El funcionamiento mencionado anteriormente dificulta el trabajo con datos de campo en donde se posee el detalle de tiempo de inicio de cada bus en el tramo, así como la información de número de pasajeros que bajan por cada bus en vez de tener que utilizar una generalización por línea mediante el porcentaje de pasajeros que bajan.

Transmodeler

TransModeler es un versátil simulador de tráfico el cual puede ser utilizado para una amplia gama de tareas de planificación y modelado de tráfico. TransModeler es capaz de simular una gran cantidad de tipos de redes desde autopistas hasta calles de los centros de las ciudades. Adicionalmente existe la posibilidad de ejecutar animaciones del

comportamiento de sistemas de tráfico de manera de visualizar operación semafórica, circulación del tráfico y el funcionamiento de la red (Transmodeler, 2021).

TransModeler ofrece una mayor facilidad para trabajar con simulaciones complejas, gracias a la integración de TransCAD, software de modelación de demanda de viajes muy utilizado en Estados Unidos, es capaz de proporcionar una evaluación de los impactos del tráfico sobre diferentes escenarios de planeamiento. Además TransModeler incluye herramientas de cartografía capaces de entregar visualizaciones de resultados fáciles de comprender

Este software tiene una arquitectura de SIG que integra los modelos de simulación de tráfico con un sistema de información geográfico (SIG), el cual ha sido mejorado para mantener, almacenar y analizar datos de transporte y tráfico (Transmodeler, 2021). Esto permite conservar información urbana o regional como los son los conteos de tráfico, carriles y velocidades. Se puede además guardar información de los planes semafóricos para escenarios múltiples y diferentes horas del día.

Como se mencionó anteriormente TransModeler es un simulador versátil que permite diferentes modelaciones, de las que se pueden destacar.

- Modela autopistas y vías urbanas con modelos que son sensibles al comportamiento del conductor y a las interacciones complejas entre vehículos en zonas de convergencia.
- Modela carriles para automóviles de alta ocupación, carriles de buses e instalaciones de peaje para mejores resultados de sus efectos sobre el tráfico.
- Modela planes de evacuación y escenarios de respuesta frente a desastres naturales, como por ejemplo derrames peligrosos entre otros tipos de emergencia.
- Modela el tráfico en zonas donde se realizan trabajos de construcción o mantenimiento.

TransModeler también puede ser empleado como simulador microscópico, logrando simular el comportamiento de cada vehículo cada décima de segundo. Es posible simular en detalle variables como; aceleración, desaceleración, intervalo entre vehículos, cambios de carril, confluencias e incorporaciones, situaciones que pueden verse

afectadas por el comportamiento del conductor, detalles del vehicula y características geométricas de la vía.

La simulación incluye parámetros que vienen por defecto, los cuales puedes ser modificados por el usuario. Esto es aplicable por ejemplo para las paradas de buses y trenes que pueden ser modeladas con sus frecuencias y programación de servicios. Además de permitir asignar parámetros como el tiempo de permanencia, capacidades de pajeros de pie y sentados.

Este software se posiciona como una alternativa sólida para simular diferentes escenarios, es intuitivo, permite no solo la modelación macroscópica, tiene una interfaz gráfica para visualizar animaciones destable e incorpora puntos de encuentro con otros softwares como es el caso de TransCAD. Sin embargo, TransModeler es un software de pago cuya licencia de un año y curso de capacitación supera los dos mil dólares para su versión base, lo cual lo posiciona como una herramienta que no es accesible para la mayoría de personas que podrían utilizarlo.

2.1.2 Modelación de paraderos de transporte público.

IRENE

El modelo IRENE, es capaz de modelar un paradero como un sistema aislado, es decir no considera el efecto de una intersección cercana o de un semáforo (Gibson *et al.*, 1989). Este es capaz de calcular los siguientes resultados:

- Capacidad del paradero y grado de saturación
- Largos de colas de buses y sus demoras.
- Rendimiento del paradero; porcentaje del tiempo que el paradero está lleno, medio lleno o vacío de buses.

Las características disponibles para el paradero según IRENE permiten simular hasta cinco sitios de detención en el paradero mediante una disciplina FIFO u OA, esta última considera un uso libre de la línea adyacente.

La capacidad estimada por el modelo es definida como el máximo número de buses que pueden entrar al área de parada por unidad de tiempo (Gibson *et al.*, 1989), esta se calcula en base a los dos estados posibles del paradero; la entrada se encuentra bloqueada durante un cierto tiempo o desbloqueada durante otro.

$$Q_B = \frac{3600n}{n/S + t_b} \quad (2.1)$$

Donde:

- n : Es el número promedio de buses que pueden entrar al paradero cuando la entrada esta libre
- S : Es el flujo de saturación en la línea de acceso al paradero [bus/s]
- t_b : Es la duración promedio de un periodo en el cual la entrada al paradero está bloqueada [s].

Respecto a la transferencia de pasajeros IRENE trabaja con la siguiente ecuación:

$$t_p = \beta_0 + \max_{i=puerta} \{\beta_1 p_{si} + \beta_2 p_{bi}\} \quad (2.2)$$

Donde:

- t_p : Tiempo por transferencia de pasajeros [s]
- β_0 : Tiempo por detención en la transferencia de pasajeros (cierre y apertura de puertas) [s].
- β_1 : Tiempo de subida por pasajero [s/pas]
- p_{si} : Número de pasajeros subiendo por la puerta i [pas]
- β_1 : Tiempo de bajada por pasajero [s/pas]
- p_{si} : Número de pasajeros bajando por la puerta i [pas]

IRENE también incluye cálculos del tiempo perdido a partir de perfiles simplificados de aceleración y desaceleración. Sin embargo, la naturaleza estocástica del modelo hace necesario ejecutarlo un cierto número de veces con tal de obtener resultados representativos.

Highway Capacity manual (HCM)

El manual Highway Capacity corresponde a un documento elaborado con el fin de entregar técnicas para evaluar la calidad del servicio de carreteras y calles, incluyendo entre ellas intersecciones semaforizadas, transporte público, peatones y bicicletas entre otros temas (HCM, 2000).

En este manual es posible encontrar apartados específicos para comprender el funcionamiento de las paradas de buses, así como ecuaciones recomendadas para calcular diferentes tiempos e indicadores del nivel de servicio de un paradero.

Tiempo de permanencia

El tiempo de permanencia es la cantidad de tiempo que un bus utiliza mientras se detiene para transferir pasajeros en el paradero (HCM, 2000). En aquellos casos en que los buses operan en tráfico mixto y se detienen en una pista de circulación, la capacidad de la vía se ve directamente disminuida según la cantidad de tiempo que están detenidos los buses. El tiempo utilizado en esta operación puede estimarse como:

$$t_d = P_a t_a + P_b t_b + t_{oc} \quad (2.3)$$

Donde:

- t_d : Tiempo de permanencia [s]
- P_a : Número de pasajeros que bajan por bus en un “peak” de 15 min.
- t_a : Tiempo de bajada de los pasajeros [s/pas].
- P_b : Número de pasajeros que suben por bus en un “peak” de 15 min.
- t_b : Tiempo de subida de los pasajeros [s/pas].
- t_{oc} : Tiempo por apertura y cierre de puertas del bus [s].

Capacidad del área de parada.

La capacidad del área de parada corresponde al número máximo de buses que pueden operar en el sitio de detención en una hora (HCM, 2000), este importante indicador es estimado según la ecuación (2.4).

$$B_{bb} = \frac{3600 \left(\frac{g}{C}\right)}{t_c + \left(\frac{g}{C}\right) t_d + Z_a c_v t_d} \quad (2.4)$$

Donde:

B_{bb} : Número máximo de buses por hora [bus/h].

$\left(\frac{g}{C}\right)$: Cantidad de verde efectivo en un ciclo del semáforo.

t_c : Tiempo de despeje entre buses sucesivos [s].

t_d : Tiempo de permanencia promedio [s].

Z_a : Probabilidad de que se produzcan colas en el paradero.

c_v : Coeficiente de variación de los tiempos de permanencia.

Esta ecuación es ampliada para poder ser utilizada en paraderos con más de un sitio de detención, sin embargo, el incremento de áreas de sitios de detención tiene un efecto decreciente sobre la capacidad del paradero.

$$B_s = N_{eb} B_{bb} \quad (2.5)$$

Donde:

B_s : Número máximo de buses por hora en un paradero [bus/h].

N_{eb} : Número efectivo de sitios de detención, según la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Eficiencia de los paraderos según el número de sitios de detención.

Sitios de detención	Sin adelantar en paradero		Adelantamiento en paradero	
	Eficiencia [%]	N_{eb}	Eficiencia [%]	N_{eb}
1	100	1.00	100	1.00
2	85	1.85	85	1.85
3	60	2.45	75	2.60
4	20	2.65	65	3.25
5	5	2.70	50	3.75

Fuente: (HCM, 2000)

2.2 Modelación en PASSION

La modelación desarrollada por PASSION (PARallel Stop SimilatION) corresponde a una de tipo microscópica, la cual se desarrolló con el objetivo de estudiar en detalle la interacción Bus-Paradero (Fernández, 2001). Este modelo nació como una alternativa para suplir las limitaciones del modelo desarrollado por IRENE (Gibson *et al.*, 1989), que fueron mencionadas anteriormente.

El modelo está constituido de tres elementos principales que interactúan entre sí: 1). El área de parada de los buses, que está conformado por un cierto número de sitios de detención (Berths), 2). La plataforma que corresponde al espacio en el cual los pasajeros esperan los buses y se realizan los procesos de carga y descarga de pasajeros y, por último, 3). La zona de salida que controla la asignación de tiempo extra según la condición imperante (libre-bloqueada).

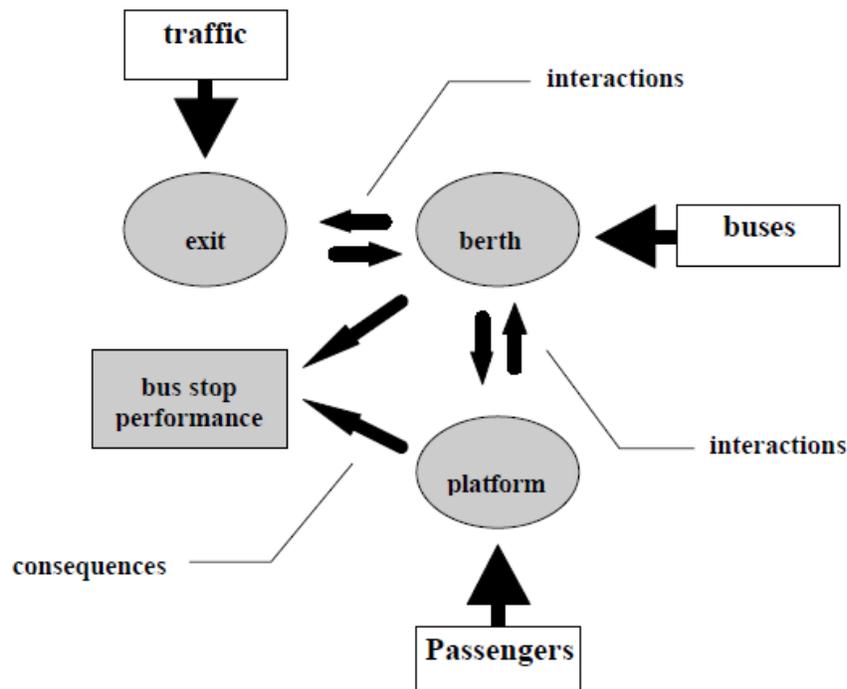


Figura 2.1. Modelo conceptual de la modelación de PASSION. Adaptado de (Fernández, 2001)

De esta manera se puede decir que el funcionamiento del modelo es a través de una serie de procesos independientes que se desarrollan de forma simultánea y que están conectados unos a otros por determinados eventos.

PASSION cuenta con cinco partes operativas principales, las que son explicadas a continuación.

- Módulo de buses.
- Módulo de pasajeros.
- Módulo de salida.
- Modelo de interacción.

Módulo de buses

El módulo de buses es el lugar en donde se ingresa o genera la información principal de cada bus del modelo. Entre esta información se encuentra; la identificación de ruta y los tiempos de llegada. Estos datos pueden ser creados en base algún archivo de entrada o generados mediante distribuciones específicas (Uniforme, Exponencial o Cowan M3).

Este módulo también recoge datos del número de pasajeros que bajan por cada bus, el tiempo medio que demoran en bajar, la capacidad restante del bus y el tiempo de bloqueo del sitio, que solamente es utilizado si es que en el módulo de salida se seleccionó “salida obstruida”.

Módulo de pasajeros

Este módulo toma los datos de los pasajeros que llegan al paradero con la intención de subir a un bus, teniendo puntos de similitud con el módulo de buses en cuanto a que se encuentra la identificación de ruta, los tiempos de llegada, que también pueden ser generados mediante diferentes distribuciones o copiados desde otros archivos, y por último el detalle de la cantidad de tiempo que toma en subir cada pasajero.

Módulo de salida

El módulo de salida recibe la información de la condición existente con la cual los buses salen de la zona de parada, esta puede ser cualquiera de las siguientes opciones:

Salida libre implica que no existirá ningún impedimento para que el bus salga de la zona de detención, por lo cual la demora extra por salida siempre será constante e igual a cero.

Salida obstruida indica que existe algún factor que impide que el bus salga libremente una vez que termino la transferencia de pasajeros, al activar esta opción se utilizarán los datos de tiempo de bloqueo previamente ingresados en el módulo buses los cuales serán asignadas a cada bus como demoras extras.

Salida controlada por semáforo señala que la zona de parada finaliza muy próxima a una intersección regulada por un semáforo, por lo cual el bus solamente podrá abandonar el lugar si es que el semáforo se encuentra en verde. Para utilizar esta opción es necesario señalar el tiempo del ciclo del semáforo y el porcentaje del ciclo que el semáforo está en rojo.

Salida mediante brecha en el tráfico adyacente, considera que el bus está obligado a ingresar a la pista adyacente para salir de la zona de parada, por lo que existe una obstrucción provocada por el tráfico en el carril adyacente. El enfoque que sigue PASSION para abordar esta situación es mediante la comparación de la brecha crítica asignando tiempo de bloqueo hasta que se produzca el espacio de tiempo adecuado. Los datos requeridos para realizar este procedimiento son; el flujo de vehículos, flujo de saturación y la brecha crítica.

Comprendido el funcionamiento de los módulos de Buses, pasajeros y salida se tiene el conocimiento de la mayoría de los datos de entrada requeridos para ejecutar PASSION, sin embargo, también se requiere saber cómo ingresar estos datos al modelo, lo cual puede ser visto en la Figura 2.2. En esta figura se muestra un archivo de texto (.txt) en donde su primera fila tiene en su primera columna el tiempo en minutos de la simulación (45 minutos), en su segunda columna el tiempo de despeje del paradero en segundos (10 segundos) y la tercera columna el tiempo muerto en segundos asignado por apertura y cierre de puertas (4 segundos). Desde la segunda fila hasta la fila solo de ceros se encuentra el módulo de buses, mientras que el módulo de pasajeros está ubicado desde la línea bajo la línea de ceros del módulo buses hasta la siguiente fila de ceros presente en el archivo.

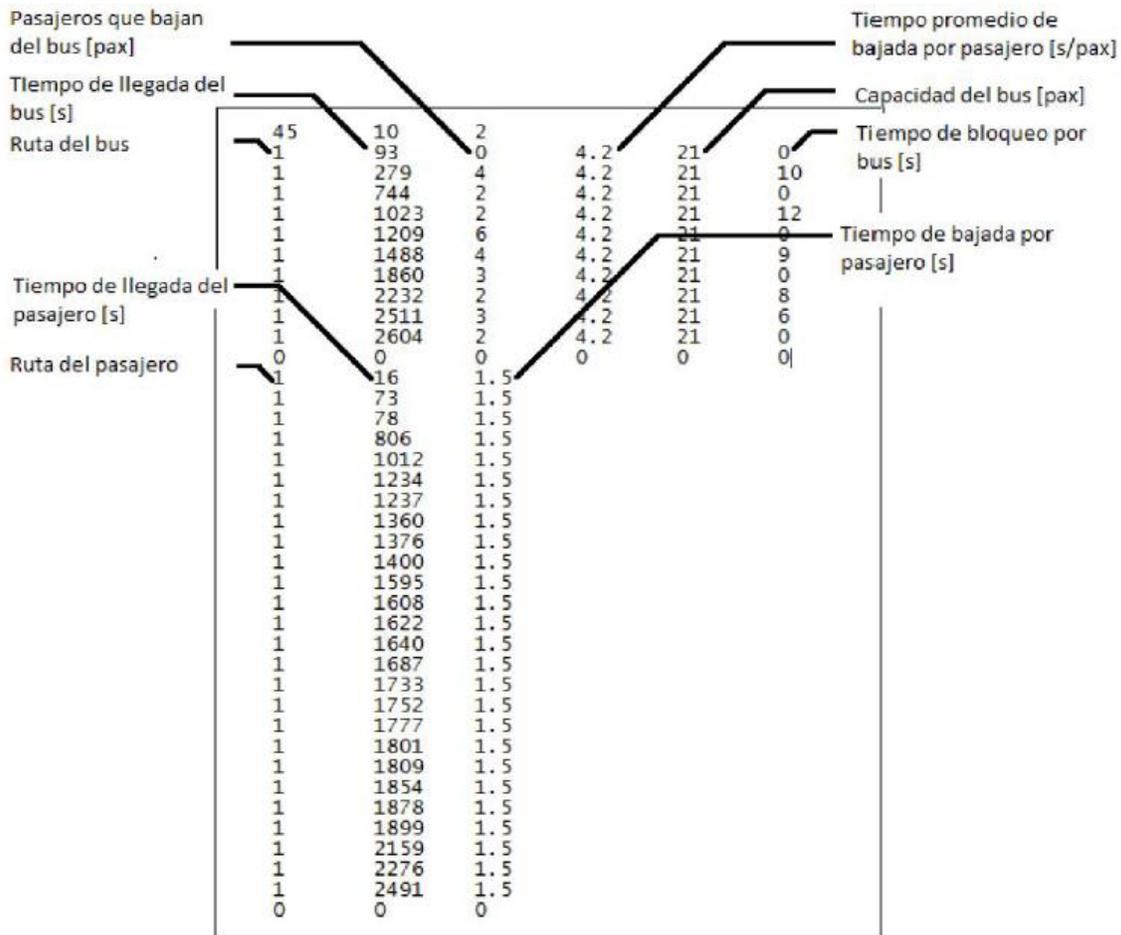


Figura 2.2. Archivo de entrada tipo de PASSION. (Fernández, 2001)

Modelo de interacción

El modelo de interacción está formado por algoritmos internos del modelo que realizan operaciones como; el ordenamiento de los datos de entrada, estimación de flujo de buses y pasajeros. Además, calculan tiempos de espera de buses y pasajeros entregando la información base con la que trabajará el módulo de resultados.

El modelo estima los flujos de buses y pasajeros como la suma de estos dividido en el periodo de tiempo asignado a la simulación. Mientras que la desviación estándar y media son usadas para ver posibles irregularidades en el comportamiento del paradero y son estimadas según la ecuación (2.6).

$$SD_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_k} (\bar{h} - h_k)}{N_k - 1}} \quad (2.6)$$

Donde:

SD_k : Desviación estándar de los tiempos de llegada de la entidad k (buses o pasajeros).

N_k : número de buses o pasajeros según sea la identidad k, presentes en la simulación.

h_k : Tiempo entre llegada de la entidad k [s].

\bar{h} : Valor medio de la entidad k [s], donde:

$$\bar{h} = \begin{cases} \frac{3600}{q}, & \text{Para buses} \\ \frac{3600}{B}, & \text{Para pasajeros} \end{cases}$$

q : Flujo medio de parada de buses durante el período de simulación [bus/h].

B : Flujo medio de subida de pasajeros durante el período de simulación [pas/h].

La interacción entre buses y pasajeros en el paradero es considerada con el tiempo de servicio de pasajeros (t_p). Este corresponde al tiempo que el bus utiliza por la subida y bajada de pasajeros. Para calcular este tiempo PASSION utiliza la ecuación (2.7).

$$t_{pi} = \begin{cases} \beta_0 + \max \left\{ \sum_{j=1}^{p_{bi}} \beta_{bj}; \beta_{ai} p_{ai} \right\}, & \text{operación paralela} \\ \beta_0 + \left\{ \sum_{j=1}^{p_{bi}} \beta_{bj} + \beta_{ai} p_{ai} \right\}, & \text{operación secuencial} \end{cases} \quad (2.7)$$

Donde:

t_{pi} : Tiempo por servicio de pasajeros del bus i [s].

β_0 : Tiempo muerto promedio por detención [s].

β_{bj} : Tiempo marginal de abordaje del pasajero j [s].

P_{bi} : Número de pasajeros que suben al bus i .

β_{ai} : Tiempo marginal de bajada de pasajeros del bus i [s/pas].

p_{ai} : Número de pasajeros que bajan del bus i .

La ecuación (2.7), considera la posibilidad de una operación paralela cuando se tiene un bus de dos puertas en donde se realiza la bajada y subida de forma simultánea o secuencial si es que solo existe una puerta para la transferencia de pasajeros.

El rendimiento del bus por su parte se realiza una vez finalizada la interacción entre buses, pasajeros y tráfico, el modelo calcula algunas estadísticas derivadas de la simulación y reporta sus resultados. Algunos de los índices de rendimientos reportados son:

- Capacidad y grado de saturación del paradero.
- Media, máximo y desviación estándar del largo de buses en cola.
- Media, máximo y desviación estándar de demora de buses.
- Promedio, máximo y desviación estándar del tiempo de espera de los pasajeros.
- Media, máximo y desviación estándar de número de pasajeros en andén.
- Desviación de los tiempos de salida de los buses desde la zona de parada.

La capacidad del paradero se calcula de forma similar a la planteada por el modelo IRENE para una parada con un sitio de detención, según la ecuación (2.8).

$$Q_b = \frac{3600N_b}{\sum_{i=1}^{N_b} (t_c + t_{pi} + t_{ei})} \quad (2.8)$$

Donde:

Q_b : Capacidad del paradero [bus/h].

N_b : Número de buses simulados.

t_c : Tiempo de despeje entre buses sucesivos [s].

t_{pi} : Tiempo por servicio de pasajeros del bus i [s].

t_{ei} : Tiempo asociado a demoras extra del bus i [s].

Según algunos autores como Gibson *et al.*(1989) y HCM (2000) el tiempo de despeje entre buses sucesivos t_c (el promedio de tiempo mínimo entre que un bus deja el sitio de detención y el siguiente entra) es posible considerarlo como el tiempo requerido para desacelerar y acelerar en la parada de autobuses sumado con el tiempo necesario para pasar por la parada de autobuses. Estas componentes son principalmente función del tipo de vehículo, por lo cual, para una parada de buses similares, el tiempo de despeje entre buses sucesivos puede considerarse como un parámetro constante para todos los buses de la simulación, según los planteado por PASSION.

El grado de saturación de la parada de buses puede ser obtenido en base a la capacidad del paradero previamente estimada y mediante la ecuación (2.9).

$$x_b = \frac{q}{Q_b} \quad (2.9)$$

Donde:

x_b : Grado de saturación de la parada de buses.

q : flujo de buses del paradero durante la simulación [bus/h].

Q_b : Capacidad del paradero [bus/h].

El parámetro de grado de saturación es utilizado como un indicador de que tan “ocupado” se encuentra el paradero y, se considera un indicador esencial para diseñar paradas de buses según la combinación de flujo de buses y demanda de pasajeros existente.

Respecto a la media de buses en cola el modelo utiliza la siguiente ecuación para calcularla:

$$L_q = \frac{\sum_{i=1}^{N_b} L_{qi} d_{qi}}{T} \quad (2.10)$$

Donde:

L_q : Media de buses en cola en el paradero [bus].

L_{qi} : Número de buses en cola encontrados por el bus i [bus].

d_{qi} : Tiempo en cola experimentado por el bus i [s].

T : Número de buses simulados.

El máximo de buses en cola durante la simulación es obtenido por $\max\{L_{qi}\}$.

Por otra parte, la media por esperas de los buses tiene diferentes componentes; esperas por transferencia de pasajeros, esperas para salir de la zona de parada, esperas en cola y esperas totales, pero todas ellas utilizan la misma expresión para su cálculo, la cual es:

$$D_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_b} d_{ik}}{N_b} \quad (2.11)$$

Donde:

D_k : Tiempo medio de espera por bus por causa k [s/bus].

d_{ik} : Tiempo de demora del bus i por causa k [s].

N_b : Número de buses simulados.

Explicado el método que utiliza PASSION para estimar los índices de rendimiento relacionados a los buses, se describirán a continuación los índices restantes referentes al tiempo promedio de espera de los pasajeros y la cantidad media de pasajeros esperando en el andén.

El tiempo promedio de espera de los pasajeros se basa una ecuación utilizada por otros autores (Holroyd y Scraggs, 1966) para describir el nivel de servicio del transporte público:

$$AWT = \frac{\sum_{j=1}^{N_p} w_j}{\sum_{i=1}^{N_b} k_{pi}} \quad (2.12)$$

Donde:

AWT : Tiempo promedio de espera por pasajero en el andén.

w_j : Tiempo de espera del pasajero j [s].

N_p : Cantidad de pasajeros presentes en la simulación.

k_{pi} : Cantidad de pasajeros en el andén cuando llega el bus i [pas].

N_b : Número de buses simulados.

Por su parte la media de pasajeros esperando en el andén difiere de lo presentado anteriormente en el apartado de medias para las esperas de los buses, pasando a ser la cantidad promedio de pasajeros en el andén a la llegada de cada bus y calculándose según la ecuación (2.13).

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^{N_b} k_{pi}}{N_b} \quad (2.13)$$

Donde:

K_p : Promedio de número de pasajeros en el andén (pasajeros).

k_{pi} : Número de pasajeros en el andén a la llegada del bus i (pasajeros).

N_b : Número de buses simulados.

2.3 Versiones anteriores de PASSION.

El desarrollo de la siguiente sección muestra las principales versiones existentes de PASSION dando énfasis en los lenguajes con los que fueron creadas y las principales contribuciones que cada una realizó. Es de vital importancia mencionar que todas estas versiones trabajan según la estructura base que se mostró en la sección anterior que corresponde a la establecida por la primera versión de PASSION (Fernández, 2001).

2.3.1 PASSION, Versión 4.2.

La versión 4.2 de PASSION (Fernández, 2001) corresponde al modelo que posee el código base, el cual fue creado mediante el lenguaje de programación de C++ y que se muestra al usuario para interactuar por medio de la plataforma DOS (*Disk Operating System*). Esta versión cumple con su función de simular paraderos con un solo sitio de detención pudiendo solamente operar bajo una disciplina FIFO debido a que jamás habrá adelantamiento.

```

*****
* PASSION 4.2 : PArallel Stop SimulatIOn - R.Fernandez (2000) *
*****

Name of this run (no blanks): run1
Data file < <8char>.txt >: dat.txt
Result file < <8char>.res >: res1

Door use <1=one-sequential,2=two-parallel>: 2
Exit conditions <1=free,2=obstructed,3=signal,4=gaps>: 2
Reading bus arrivals....
Reading pass arrivals...
Do you want information of each bus <y/n>?: y
Do you want information of each passenger <y/n>?:

```

Figura 2.3. Interfaz de PASSION versión 4.2.

Los datos de entrada que utiliza esta versión son creados mediante un archivo de texto, según lo indicado en la Figura 2.3, mientras que la información de la cantidad de puertas de los buses, es un parámetro general introducido directamente en la interfaz de interacción del usuario. La condición de salida también tiene que ser especificada en esta interfaz, pudiendo ser; libre, obstruida, controlada por semáforo o con brecha en el tráfico adyacente.

El modelo entrega por defecto resultados con los datos generales de la simulación, estadísticas generales e información respecto a las características de la cola según lo muestra la Figura 2.4. Otras dos secciones de resultados son consultadas en la interacción de usuario si es que se desean ver, estas son; información de cada bus e información de cada pasajero de la simulación.

```

*****
* PASSION 4.2 : Parallel Stop Simulation - R.Fernandez (2000) *
*****

Datos de la simulacion:
=====
Nombre de la simulación : stop1
Rutas usando el paradero : 1 ruta
periodo de simulación : 45 min
Flujo de buses : 20 bus/h (sd llegada buses: 156.20 s)
Demanda de Subida : 35 pass/h (sd llegada pass : 152.24 s)
Demanda de Bajada : 51 pass/h
una puerta, Subidas y Bajadas secuenciales...
Salida libre...

Resultado de la simulacion:
=====
Tiempo de espera promedio por pas : 2.51 min (max: 5.92 sd: 1.72)
Nº pasajeros promedio en el andén : 1.73 pass (max: 11.00)

Tiempo promedio de transf por bus : 15.24 s/bus (max: 31.10 sd: 8.26)
Demora extra promedio por bus : 0.00 s/bus (max: 0.00 sd: 0.00)
Demora promedio de bus en cola : 6.88 s/bus (max: 32.10 sd: 10.90)
Demora total promedio por bus : 32.12 s/bus (max: 60.90 sd: 11.15)

Capacidad del sitio : 142.63 bus/h (sat: 0.14)
Largo promedio de la cola de bus : 0.06 buses (max: 2.00)
Desviacion del tiempo de salida : 145.98 s

Caracteristicas de la cola :
-----
Frecuencia de Colas
(bus) (%) (s)

0 67 0
1 20 15
2 13 28
    
```

Figura 2.4. Archivo de salida tipo de PASSION 4.2

2.3.2 PASSION, Versión 5.0.

La versión 5.0 de PASSION (Fernández y Moreno, 2005) fue creada con el primer objetivo de mejorar la forma en como este interactúa con el usuario. Con este fin se desarrolló en visual C++, ejecutándose sobre la plataforma de Windows, pudiendo desplegar cuatro menús interactivos: datos del paradero, demanda del paradero, condiciones de salida y simulación animada.

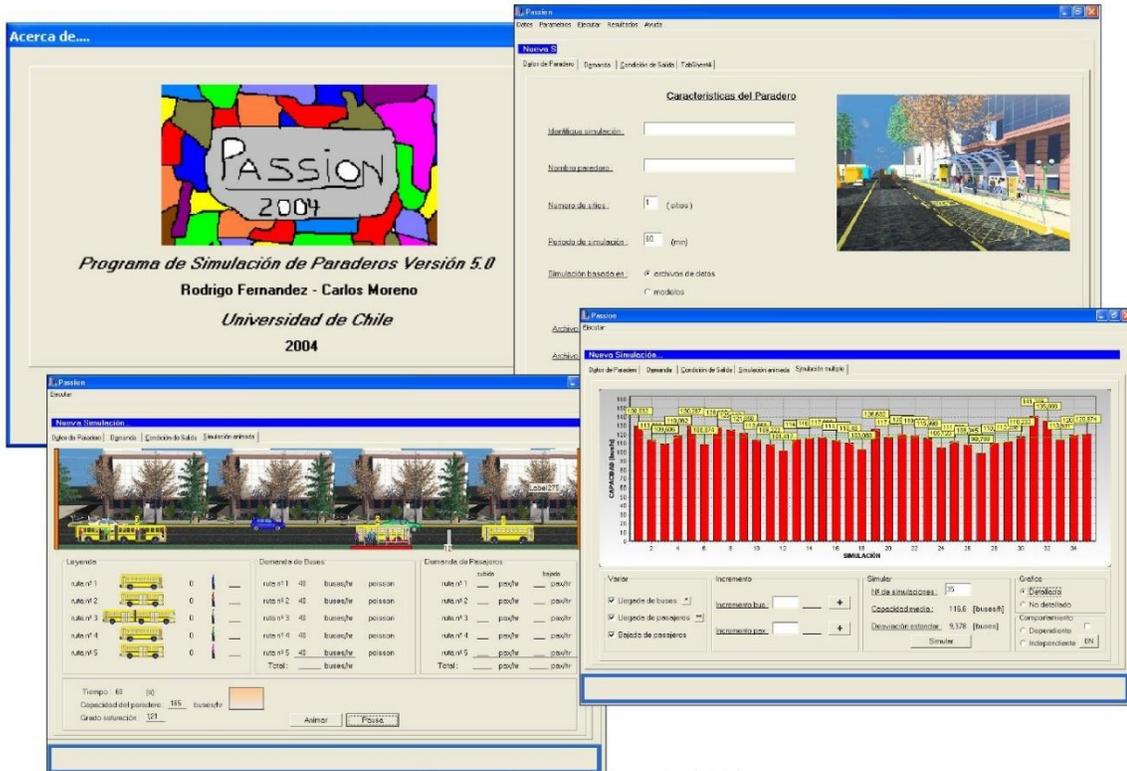


Figura 2.5. Interfaz de PASSION 5.0. (Fernández y Moreno, 2005)

Con respecto al funcionamiento del modelo, se incorporó una nueva forma de calcular el tiempo que el bus permanece detenido por transferencia de pasajeros reemplazando la ecuación (2.7) por la siguiente ecuación (2.14) según Gibson *et al.*, (1997):

$$t_p = \beta_0 + \dot{\beta}_0 \delta_1 + \max_{j=\text{puerta}} \{ [\beta_1 + \dot{\beta}_1 \delta_1 + \ddot{\beta}_1 \delta_2] p_{sj} + [\beta_2 \exp(-\dot{\beta}_2 p_{bj}) + \ddot{\beta}_2 \delta_3] p_{bj} \} \quad (2.14)$$

Donde:

t_p : Tiempo que un bus permanece detenido por transferencia de pasajeros [s].

β_0 : Tiempo muerto promedio por detención [s].

δ_1 : Variable binaria que toma valor 1 si es que hay más de 10 pasajeros en el andén y 0 en cualquier otro caso.

δ_2 : Variable binaria que toma valor 1 si es que hay más de 4 pasajeros en el andén y 0 en cualquier otro caso.

δ_3 : Variable binaria que toma valor 1 si es que la capacidad del bus es inferior al 30% y 0 en cualquier otro caso.

p_{sj} : Número de pasajeros que bajan por la puerta j.

p_{bj} : Número de pasajeros que suben por la puerta j.

La tercera incorporación realizada por esta versión corresponde a cuatro distribuciones para generar llegadas de pasajeros y buses estas son; llegadas uniformes, llegadas aleatorias Poisson, Cowan M3 y una distribución de intervalos que puede ser definida por el usuario.

A pesar de las importantes incorporaciones ya mencionadas la versión 5.0 de PASSION incluye una importante mejora más al permitir simular un paradero con hasta dos sitios de detención.

2.3.3 PASSION XLS

La versión PASSION XLS (Aguirre, 2014) trabaja en torno al eje central de PASSION (Fernández, 2001), agregando mejoras de versiones sucesoras. La primera mejora a simple vista es un cambio total de interfaz al pasar de trabajar en plataforma DOS (*Disk Operating System*) hacia Microsoft Excel.

La programación se realizó en el lenguaje de Visual Basic para aplicaciones de Excel, creando una interfaz más amigable, que permite el ingreso de todas las variables mediante formularios y hojas de datos desplegables.

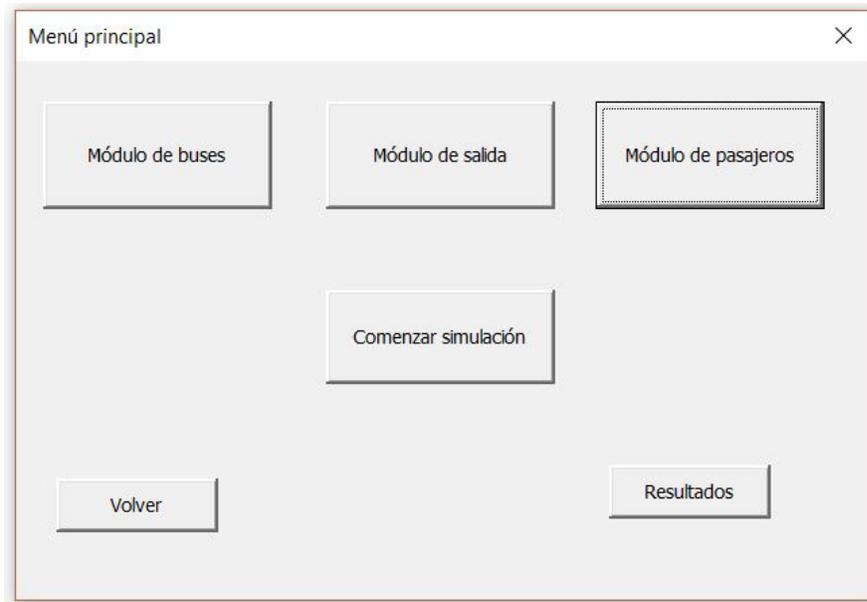


Figura 2.6. Interfaz PASSION XLS.

Respecto a la simulación se habilitó la posibilidad de simular un paradero con hasta cinco sitios de detención, agregando además dos disciplinas de salida del paradero para paraderos con múltiples sitios de detención: FIFO y FIAO, siendo la primera una opción a utilizar cuando no es posible el adelantamiento para salir del paradero y FIAO cuando si es posible realizar maniobras de adelantamiento. Estas mejoras conllevaron una modificación a la ecuación (2.8) para calcular la capacidad del paradero bajo disciplina FIAO según (Charad, 2007).

$$Q_b = \frac{3600N_b}{\sum_{i=1}^{N_b} (t_c + t_{pi} + t_{ei})} N_s \quad (2.15)$$

Donde:

- Q_b : Capacidad del paradero [bus/h].
- N_b : Número de buses simulados.
- t_c : Tiempo de despeje entre buses sucesivos [s].
- t_{pi} : Tiempo por servicio de pasajeros del bus i [s].

t_{ei} : Tiempo asociado a demoras extra del bus i [s].

N_s : Número de sitios de detención.

El tiempo por transferencia de pasajeros también fue modificado, debido a que ahora se permiten simular buses con más de dos puertas para subir y bajar pasajeros pasando a ser según la siguiente ecuación:

$$PST = \beta_0 + \text{máx} \left\{ \frac{\beta_{ai} P a_i}{d_i - 1}, \sum_{j=1}^{P_{bi}} \beta_{bj} \right\} \quad (2.16)$$

Donde:

PST : Tiempo por transferencia de pasajeros del bus i [s].

β_0 : Tiempo muerto por bus [s].

β_{ai} : Tiempo promedio por pasajero en bajar del bus i [s/pas].

β_{bj} : Tiempo que demora el pasajero j en bajar del bus i [s/pas].

$P a_i$: Cantidad de pasajeros que bajan desde el bus i.

P_{bi} : Cantidad de pasajeros que suben al bus i.

d_i : Cantidad de puertas del bus i.

El módulo de buses pasa de ser un archivo de texto a una hoja de cálculo de Excel (Figura 2.7) en la cual ahora cada columna tiene especificada la variable a la que corresponde y cada fila toma los datos de un bus. Adicionalmente existe la posibilidad de generar datos en esta misma hoja mediante tres distribuciones integradas; uniforme, exponencial y Cowan M3, las cuales pueden ser calibradas según los parámetros necesarios.

Identificación ruta	Tiempo de llegada del bus	Pasajeros que bajan del bus	Tiempo medio de bajada pass	Capacidad del bus	Tiempo de bloqueo del sitio	Cantidad de puertas
53	156	1	2	35	0	2
72	242	0	0	35	0	2
81	383	1	1	35	0	2
83	490	1	2	35	0	2
52	646	1	2	35	0	2
51	650	2	2	35	0	2
11	773	0	0	35	0	2
53	907	1	2	35	0	2
72	1191	2	2	35	0	2
13	1262	2	1	35	0	2
81	1365	3	2	35	0	2
12	1651	1	2	35	0	2



Generar llegadas aleatorias

Continuar

Figura 2.7. Ejemplo Módulo buses PASSION XLS.

El módulo de pasajeros por su parte pasa a tener una hoja de cálculo para tomar datos, similar a la del módulo de pasajeros, en la cual también es posible generar datos de acuerdo a las mismas tres distribuciones del módulo de buses.

Los resultados de este modelo son mostrados en hojas de cálculo, estos son; estadísticas generales, información sobre los buses, información sobre los pasajeros e información sobre las colas de buses. Cada uno se muestra en una hoja por separado teniendo además un macro en la misma hoja para guardar de forma rápida los resultados deseados.

PASSION XLS: PARALLEL STOP SIMULATION			
Datos de la simulación:			
Nombre de la simulación:	Sin nombre		
Rutas usando el paradero:	2	rutas	
Sitios de detención:	3		Disciplina de salida: FIAO
Tiempo simulado:	31	[min]	
Flujo de buses:	23	[bus/h]	(Dev. Est. llegada buses: 84.72)
Demanda de embarque:	31	[pax/h]	(Dev. Est. llegada pasajeros: 69.39)
Demanda de bajada:	27	[pax/h]	
Condición de salida:	Salida controlada por semáforo: ciclo de 50 [s], porcentaje de rojo 25%		
Resultados de la simulación:			
Espera promedio por pasajero:	1.28	[min]	(máx: 4.63 Dev. Est: 1.34)
Pasajeros promedio en andén:	1.00	[pax]	(máx: 2.00)
Demora promedio por transferencia por bus:	5.33	[s/bus]	(máx: 8.00 Dev. Est: 1.78)
Demora extra promedio por bus:	1.20	[s/bus]	(máx: 7.80 Dev. Est: 2.66)
Demora en cola promedio por bus:	0.00	[s/bus]	(máx: 0.00 Dev. Est: 0.00)
Demora total promedio por bus:	11.93	[s/bus]	(máx: 21.20 Dev. Est: 4.11)
Capacidad del paradero:	905.03	[bus/h]	(grado sat: 0.03)
Largo promedio en cola por bus:	0.00	[bus]	(máx: 0.00)
Desviación estándar del tiempo de salida:	82.77	[s]	

Figura 2.8. Ejemplo de estadísticas generales PASSION XLS.

2.3.4 SESSION.

SESSION (Montero, 2020) nace desde la base establecida por PASSION XLS, es decir se ejecuta a través de Microsoft Excel con el lenguaje de programación de Visual Basic para aplicaciones. El objetivo principal de este es entregar al usuario la opción de realizar múltiples simulaciones automáticas variando parámetros como; el flujo de buses por hora, la demanda de pasajeros o ambos.

Estas simulaciones múltiples incorporan además un método de mejora de resultados, el cual consiste en que por cada simulación especificada el programa se ejecuta 33 veces. Los resultados de estas 33 corridas se promedian pasando hacer el resultado oficial de una simulación de las “n” indicadas (Montero, 2020).

Otra característica importante agregada por SESSION es la posibilidad de simular dos paraderos consecutivos separados cierta distancia, permitiendo que cada uno tenga una de las cuatro condiciones de salida mencionadas en la descripción de PASSION XLS.

La interfaz del usuario conserva varias similitudes con lo establecido por PASSION XLS, en este sentido el módulo de buses y pasajeros es idéntico tanto en estética como en

funciones ofrecidas. Los principales cambios están dados por nuevos formularios que recogen los nuevos datos de cantidad de simulaciones, parámetros a variar entre simulaciones y distancia entre paraderos junto a velocidad media de los buses, si es que se busca simular dos paraderos.

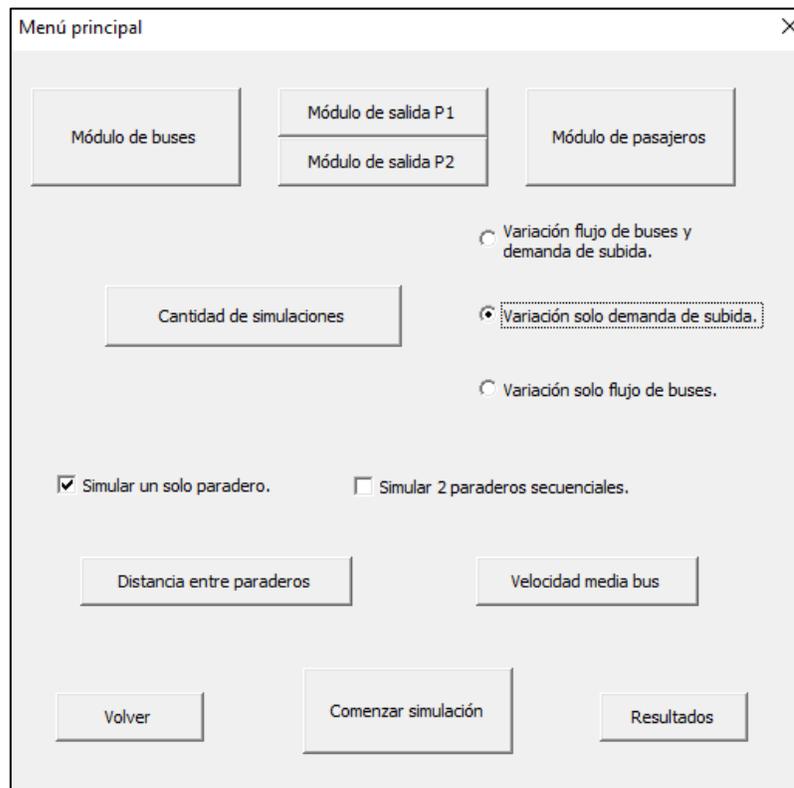


Figura 2.9. Interfaz de SESSION

A pesar de que pueden simularse dos paraderos secuenciales, solamente existe un módulo de pasajeros para especificar la demanda. Esto implica que ambos paraderos comparten la misma demanda de pasajeros. Esta situación sucede de forma similar para el módulo de buses donde es imposible ingresar información específica respecto al segundo paradero. Lo cual limita el campo de aplicación a pares de paraderos con demanda de buses y pasajeros semejantes.

Respecto a los resultados existen diferencias con PASSION XLS principalmente debido a que el apartado de estadísticas generales pasa a ser “resultados generales”. En esta nueva sección se encuentran los resultados ordenados en columnas para cada una de las “n” simulaciones de forma de ver más simplemente las variaciones que existen entre cada una.

Datos de cada simulación:										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Numero de simulación actual:										
Nombre de la simulación:	Sin nombre									
Numero de rutas usando el paradero:	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sitios de detención:	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Disciplina de salida:	FIFO									
Tiempo simulado: [min]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Flujo de buses: [bus/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SD llegada buses:	219,3237373	120,737116	76,0715691	55,6537348	44,1739321	35,5318665	31,8144754	27,4802724	24,2296287	21,8887822
Demanda de subida: [pax/h]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
SD llegada pasajeros:	21,18048624	11,3843746	7,36127649	5,41877286	4,31846079	3,66526508	3,05978087	2,67233064	2,38041003	2,14582452
Demanda de bajada: [pax/h]	100	190	290	390	490	590	690	790	890	990
Condición de salida:	Salida libre									
N° de corridas de simulación:	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Figura 2.10. Ejemplo de resultados generales SESSION.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE PASSION K

Capítulo 3. Desarrollo de PASSION K

En este capítulo se indicará en detalle las capacidades ofrecidas por PASSION K, el marco de simulación, el lenguaje y la plataforma utilizada para el desarrollo, la descripción analítica y el funcionamiento mediante sus diferentes elementos constituyentes.

3.1 Descripción General.

PASSION K es desarrollado como una forma de ampliar las capacidades ofrecidas por PASSION XLS (Aguirre, 2014), manteniendo la mayor parte de los avances hechos hasta esa versión y construyendo sobre esta base.

La nueva versión busca habilitar la simulación de dos paraderos continuos separados cierta distancia, permitiendo las cuatro condiciones de salida para cada uno, las cuales son; libre, obstruida, controlada por semáforo o con brecha en el tráfico adyacente.

Como una forma de quitar la limitación de SESSION al tener los mismos buses interactuando en el paradero uno y dos, se modifica el módulo de buses de forma de recoger información específica para el paradero dos. Esta modificación permite agregar los escenarios que existen cuando un bus pasa al paradero uno y no al dos, y viceversa.

PASSION K además incorpora un nuevo módulo de demanda de pasajeros para el paradero dos, este nuevo módulo permite diferenciar la demanda de pasajeros, manteniendo todas las características del módulo de pasajeros existente. Es decir que incorpora también las tres distribuciones para generar datos; uniforme, exponencial y Cowan M3. Con esto se facilita la simulación de pares de paraderos con diferentes demandas de pasajeros, mejorando los resultados.

Por último, se agrega una nueva metodología para simular el comportamiento del semáforo. Junto a esta nueva metodología implementada para el semáforo se incorpora la posibilidad de simular pares de paraderos separados por un semáforo en los cuales el semáforo mantiene una cierta distancia hasta el paradero, de tal forma que la salida de los paraderos no es controlada por los semáforos, pero si influyen en el tiempo de desplazamiento que hay entre ambos pares. Estas funciones amplían el campo de aplicación del modelo y mejoran mediante resultados más precisos las demoras asociadas a esta condición de salida cuando sea especificada.

3.2 Marco de simulación

En línea con las versiones predecesoras, PASSION K estudia a través de la micro simulación, las interacciones que se realizan en los paraderos entre buses, pasajeros y tráfico cercano.

Como se desarrolla desde la base establecida por PASSION XLS, mantiene características como la posibilidad de simular paraderos con hasta cinco sitios de detención con disciplinas de salida FIFO y FIAO.

Cada simulación comienza mediante la selección de los buses indicados en el módulo de buses. Esta selección se realiza de forma automática separando todos los buses que tienen pasajeros que bajan y/o toman pasajeros en el primer paradero. Si se ha especificado la simulación de dos paraderos consecutivos, los buses que no fueron seleccionados para pasar al primer paradero se les asocia un tiempo por desplazamiento hasta el paradero dos.

Una vez los buses fueron seleccionados, continua la llegada del bus al área de parada, se asume que el bus se posicionará siempre en la parada disponible más cercana a la zona de salida. Después de esto ocurrirá la transferencia de pasajeros que como las otras versiones involucra la apertura de puertas, la subida y bajada de pasajeros y el cierre de puertas. Finalizado el proceso de transferencia de pasajeros el bus saldrá del paradero, esta salida tendrá un tiempo asociado según la condición de salida, si es libre no habrá demora extra, obstruida agregará demoras según lo indicado en el módulo de buses, para salida condicionada por semáforo y con brecha en el tráfico adyacente se calculará internamente si al tiempo de salida le corresponde una demora extra asociada.

De seleccionarse la opción de simular dos paraderos consecutivos, se asocia un tiempo por desplazamiento desde el primer paradero hasta el segundo. Se considera que los buses se desplazan a una velocidad constante, dejando fuera cualquier factor de aceleración o desaceleración y cualquier tipo de influencia externa. Llegando al paradero dos se efectúa una nueva selección de los buses haciendo interactuar solamente a los buses que tienen pasajeros que dejar y/o subir. Luego se repite el mismo proceso descrito anteriormente desde la llegada hasta la salida de los buses.

El apartado de resultados mantiene los mismos elementos de PASSION XLS los cuales son; resultados generales, resultados de buses, resultados de pasajeros y resultados de cola. Considerando que ahora se habilita la simulación de un paradero más se agregan estos mismos resultados, pero para el paradero dos.

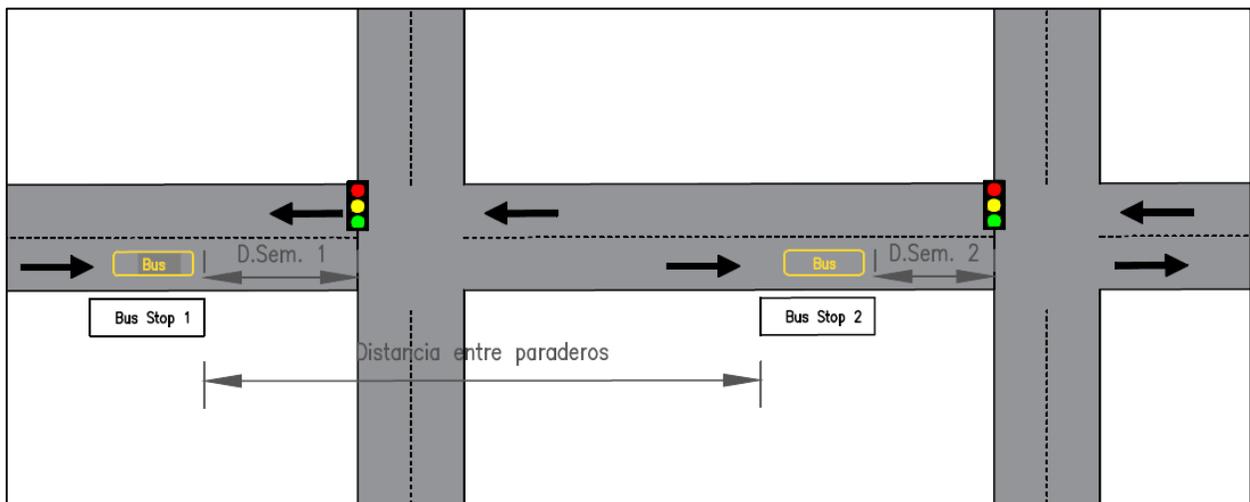


Figura 3.1. Escenario tipo modelado por PASSION K.

3.3 Plataforma de programación.

La plataforma de programación es mediante el lenguaje de *Visual Basic for Applications* de Excel, continuando como se mencionó anteriormente acorde a la base de PASSION XLS. Esto fue determinado a la mayor familiaridad que pueden tener los usuarios de usar Excel frente a otras plataformas basadas en lenguajes como C++. Además, el trabajo de datos mediante formularios y hojas de cálculo hace más difícil el error humano, en comparación por ejemplo al uso archivos de texto, en donde un espacio de más es difícil detectar en una serie y acarrea un error en la modelación.

3.4 Descripción analítica

Los cálculos realizados por la nueva versión se basan en la mayoría de las ecuaciones descritas para PASSION XLS.

El cálculo de la capacidad del paradero se realiza según la disciplina indicada; FIFO o FIAO, para el primer caso se utiliza la ecuación (2.8) mientras que para el segundo caso es la ecuación (2.15).

La estimación del tiempo de transferencia de pasajeros se efectúa según la ecuación (2.16), el grado de saturación por su parte es según la ecuación (2.9).

Otras estadísticas como es el caso de largo promedio de colas, demora total promedio de buses y espera promedio de pasajeros se calculan de acuerdo a las ecuaciones (2.10, (2.11 y (2.12) respectivamente.

Las desviaciones estándar se calculan según la ecuación (2.6).

La nueva metodología para el funcionamiento del semáforo asigna tiempo de rojo según la siguiente ecuación.

$$t_{sem} = \begin{cases} t_{rojo} + t_{ciclo} \cdot r_{verde} - t_{salida}, & t_{salida} > t_{rojo} \\ 0, & t_{salida} \leq t_{rojo} \end{cases} \quad (3.1)$$

Donde:

t_{sem} : Cantidad de tiempo extra asociado al bus por demoras en el semáforo [s].

t_{rojo} : Tiempo de la simulación en el cual comienza la asignación de rojo asociado al número del ciclo, según el tiempo de salida asociado [s].

t_{ciclo} : Ciclo del semáforo [s].

r_{verde} : Razón porcentual de verde del ciclo del semáforo.

t_{salida} : Tiempo en el cual la unica posible limitante del bus para continuar es la condición del semáforo [s].

A modo de ejemplo de la operación de esta ecuación, se toma un bus listo para continuar su trayecto en el segundo 180 de la simulación (t_{salida}), el ciclo del semáforo es de 100 [s], con una razón de verde del 50% en donde el verde comienza en el segundo 0 de la

simulación. El primer ciclo esta entre los 0 y los 100 [s], el segundo de 101 a 200 [s] y así sucesivamente. Dado que t_{salida} es 180 [s] se sabe que se encuentra en el segundo ciclo del semáforo de la simulación, para el segundo ciclo el tiempo de rojo comienza a los 150 [s] (t_{rojo}) que es menor al tiempo de salida (180 [s]), por ende, el tiempo asociado a demora por semáforo es $150+100*0.5-180=20$ [s].

El tiempo asociado por desplazamiento entre paraderos se estima en base a la distancia y la velocidad en el arco que desarrollan los buses según la ecuación (3.2).

$$t_d = \frac{d_k}{v} \quad (3.2)$$

Donde:

t_d : Cantidad de tiempo por desplazamiento [s].

d_k : Distancia a recorrer [m].

v : Velocidad que desarrolla el bus en los arcos [m/s].

La ecuación (3.2) es utilizada en dos posibles escenarios, el primero corresponde a buses que no se detienen a interactuar en el primer paradero, estos se desplazan una determinada longitud hasta el paradero dos según la ecuación (3.3).

$$d_1 = l_m N_s + d_p \quad (3.3)$$

Donde:

d_1 : Distancia a recorrer hasta el paradero dos los buses que no paran en el paradero uno [m].

l_m : Largo medio del sitio de detención (12 [m]).

N_s : Número de sitios de detención.

d_p : Distancia entre paraderos [m].

El segundo escenario viene dado por la distancia que recorren los buses desde la salida del paradero uno hasta llegar al paradero dos, calculado según la ecuación (3.4).

$$d_2 = d_p \quad (3.4)$$

Donde:

d_1 : Distancia a recorrer hasta el paradero dos los buses que se detienen en el primer paradero [m].

d_p : Distancia entre paraderos [m].

3.5 Funcionamiento de PASSION K

Durante esta sección se realizará una explicación en detalle del funcionamiento de la nueva versión, indicando los principales cambios respecto a versiones anteriores. PASSION K está enfocado en la simulación de dos paraderos continuos separados por un semáforo, situación en la cual se pueden aprovechar todas las incorporaciones realizadas en este trabajo.

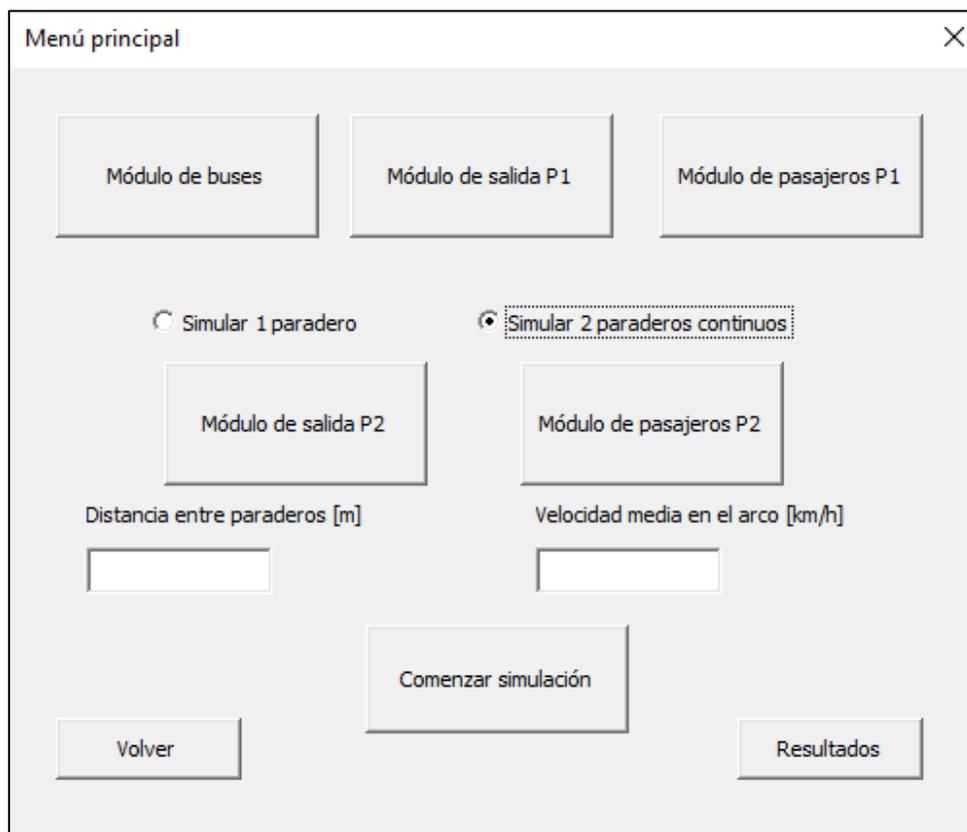


Figura 3.2. Interfaz de PASSION K.

La interfaz de PASSION K mantiene varios puntos de similitud con las versiones previas de PASSION XLS y SESSION como le muestra la Figura 3.2. Esta interfaz mantiene el módulo de buses, módulo de pasajeros y módulo de salida, además de secciones para especificar cuantos paraderos se desean simular y, los parámetros de distancia entre paraderos junto a velocidad en el arco, si es que se buscan simular dos paraderos.

3.5.1 Parámetros del paradero y simulación.

Al comenzar la simulación se desplegará el primer formulario para tomar datos generales del paradero y la simulación, este formulario puede verse en la Figura 3.3. El detalle de cada uno de estos datos solicitados será explicado en esta sección para su correcta comprensión.

Parámetros de la simulación

Ingrese los siguientes parámetros necesarios para la simulación:

- Duración total de la simulación y unidad de medida
- Tiempo de despeje entre buses
 (Segundos)
- Tiempo muerto por bus
 (Segundos)
- Cantidad de sitios de detención para buses en el paradero
- Disciplina de salida
 FIFO (First In, First Out)
 FIAO (First In, Any Out)

Figura 3.3. Formulario de parámetros generales de PASSION K.

- a) Duración total de la simulación: Corresponde a la cantidad total de tiempo asignada a la simulación. Todos los resultados como por ejemplo el flujo de buses serán estimados en base a este parámetro.
- b) Tiempo de despeje entre buses: Este tiempo corresponde al utilizado por el bus en dos momentos; el primero de ellos es el que existe en la llegada del bus desde que el parachoques delantero del bus pasa la línea que delimita la zona de parada hasta que el parachoques trasero también la pasa. La segunda parte es la misma interacción de los parachoques, pero considerando la salida de la zona de parada. Esta medición solo se realiza en aquellos buses que no tienen condicionada su velocidad por obstrucciones tanto de llegada como de salida
- c) Tiempo muerto por bus: Es la cantidad de tiempo promedio que los buses utilizan para abrir y cerrar sus puertas.
- d) Cantidad de sitios de detención: Corresponde al número de sitios efectivos que se utilizan en el paradero para realizar la transferencia de pasajeros. Al igual que PASSION XLS y SESSION se pueden simular paraderos con hasta cinco sitios de detención.
- e) Disciplina de salida: Esta información condiciona el ordenamiento que seguirán los buses en la simulación para salir del paradero, el modelo entrega dos alternativas:
 - FIFO (First in, First out): Esta disciplina es utilizada cuando los buses no pueden adelantar al bus que tienen delante de ellos en el paradero, por lo cual el orden de salida será el mismo al orden de llegada al paradero.
 - FIAO (First in, Any out): Esta disciplina es aplicable cuando los buses tienen libertad para realizar maniobras de adelantamiento para salir del paradero. Esta salida se da una vez finalizada la transferencia de pasajeros y no importa el estado en el cual se encuentren el resto de buses en el paradero.
 -

3.5.2 Módulo de buses.

Este módulo toma los datos referentes al detalle de cada bus. Esta información se ingresa a una hoja de cálculo dedicada para este apartado. Los datos que se ingresan en esta sección son:

Identificación ruta	Tiempo de llegada del bus	Pasajeros que bajan del bus P1	Tiempo medio de bajada pass	Capacidad del bus	Tiempo de bloqueo del sitio P1	Cantidad de puertas	Pasajeros que bajan del bus P2	Tiempo med. de baj. Pass P2	Tiempo de bloqueo del sitio P2
1	127	2	2	25	0	2	1	2	0
1	231	1	2	25	0	2	1	2	0
1	285	3	2	25	0	2	0	2	0
1	288	3	2	25	0	2	2	2	0
1	435	2	2	25	0	2	1	2	0
1	443	1	2	25	0	2	1	2	0
1	598	3	2	25	0	2	1	2	0
1	665	3	2	25	0	2	3	2	0
1	822	0	2	25	0	2	2	2	0
1	993	1	2	25	0	2	0	2	0
1	1087	3	2	25	0	2	2	2	0
1	1097	2	2	25	0	2	3	2	0
1	1181	1	2	25	0	2	2	2	0
1	1293	2	2	25	0	2	1	2	0
1	1340	1	2	25	0	2	2	2	0
1	1489	3	2	25	0	2	1	2	0
1	1595	3	2	25	0	2	1	2	0
1	1759	0	2	25	0	2	0	2	0
1	1884	3	2	25	0	2	3	2	0
1	1928	2	2	25	0	2	1	2	0
1	1947	3	2	25	0	2	1	2	0



Generar llegadas aleatorias

Continuar

Figura 3.4. Ejemplo del módulo de buses de PASSION K.

- a) Identificación ruta: Se especifica la línea a la cual corresponde cada bus.
- b) Tiempo de llegada del bus: En esta columna se indica el tiempo en el cual el bus llega al paradero [s].
- c) Pasajeros que bajan del bus P1: En este parámetro se ingresa la cantidad de pasajeros que bajan en el paradero uno para cada bus de la simulación.
- d) Tiempo medio de bajada pass: Este dato toma la información del tiempo promedio que cada pasajero tarda en bajar del bus una vez el bus está detenido y sus puertas se han abierto.
- e) Capacidad del bus: Corresponde a la capacidad disponible de pasajeros con la cual el bus llega al paradero uno.
- f) Tiempo de bloqueo del sitio P1: Es el tiempo asignado al bus por demoras extras que experimenta cada bus. Estos valores solamente son considerados en los cálculos de considerarse una condición de salida obstruida en el módulo de salida.
- g) Cantidad de puertas: Es el número de puertas que utiliza cada bus para la transferencia de pasajeros.

Cuando se busca simular dos paraderos continuos separados por un semáforo es necesario ingresar información específica para este. Esta información corresponde al;

número de pasajeros que bajan en el paradero dos, tiempo medio de bajada y tiempo de bloqueo, si es que se considera salida obstruida en el paradero dos.

El módulo de buses adicionalmente contiene la opción de generar llegadas aleatorias como lo muestra la Figura 3.4, estas distribuciones serán explicadas en detalle a continuación.

Distribución Uniforme

La primera opción en las distribuciones disponibles corresponde a la distribución uniforme. Esta función genera datos aleatorios para los tiempos de llegada de los buses considerando el flujo de buses indicados y el tiempo de simulación previamente señalado. La cantidad de pasajeros también se genera aleatoriamente si es que se indica que así lo sea.

Distribución Exponencial

La distribución exponencial genera datos aleatorios para las llegadas de los buses y la cantidad de pasajeros que bajan de cada bus. Estas variables aleatorias se generan según la ecuación (3.5).

$$x_e = -\beta \ln(1 - u) \quad (3.5)$$

Donde:

- x_e : Variable aleatoria con distribución exponencial
- β : Corresponde a $1/q$, donde q es el flujo de buses [bus/s].
- u : Número aleatorio entre 0 y 1.

Distribución Cowan M3

La distribución Cowan M3 considera que un porcentaje de buses llegan muy seguidos unos de otros al paradero. Estos datos generados son creados según la ecuación (3.6).

$$x_c = \Delta - \beta \ln\left(\frac{1 - u}{1 - \theta}\right) \quad (3.6)$$

Donde:

- x_c : Variable aleatoria con distribución Cowan M3

- Δ : Intervalo mínimo entre llegadas $1/Q$, donde Q es la capacidad del bus [bus/s]
- β : Corresponde a $1/q$, donde q es el flujo de buses [bus/s].
- u : Número aleatorio entre 0 y 1.
- θ : Proporción de buses que llegan en pelotón.

3.5.3 Módulo de salida

Como se mencionó anteriormente PASSION XLS tiene cuatro opciones para simular la condición de salida de los buses, estas mismas condiciones son heredadas por la nueva versión:

- Libre: La salida implica que el bus sale del paradero sin ningún tiempo extra asociado a demoras, es decir el bus termina la transferencia de pasajeros y abandona inmediatamente la zona de detención.
- Obstruida: Esta opción se utiliza cuando existen demoras extras asociadas a algún factor que impide la libre salida del paradero. Los datos se ingresan mediante el módulo de buses, tiempos de bloqueo.
- Controlada por semáforo: Esta alternativa simula el comportamiento de un semáforo para asignar demoras extras. Es requerido ingresar el ciclo del semáforo, el porcentaje de tiempo asignado a rojo y el tiempo de inicio de verde, si es que se busca considerar algún desfase.
- Brecha en tráfico adyacente: Se utiliza cuando el bus necesita ingresar a la pista adyacente para abandonar el paradero. La información requerida para modelar esta situación es; el flujo vehicular [veh/h], flujo de saturación [veh/h] y la brecha crítica. Esta última se define como el espacio de tiempo mínimo promedio que necesita el bus para integrarse al flujo vehicular adyacente[s].

3.5.4 Módulo de pasajeros

El módulo de pasajeros de forma similar al de buses recoge la información específica de cada pasajero. Estos datos se ingresan en una hoja de cálculo específica como lo muestra la Figura 3.5.

Ruta Pasajero	Tiempo de Llegada	Tiempo medio en subir
72	235	2
11	545	2
11	754	2
81	990	2



Generar llegadas aleatorias

Continuar

Figura 3.5. Ejemplo del módulo de pasajeros de PASSION K.

- a) Identificación ruta: Se especifica la línea a la cual corresponde cada bus.
- b) Tiempo de llegada: En esta columna se indica el tiempo en el cual el bus llega al paradero [s].
- c) Tiempo medio en subir: Este dato toma la información del tiempo que cada pasajero tarda en subir al bus una vez el bus está detenido y sus puertas se han abierto.

Respecto a la generación de datos aleatorios, es posible utilizar tres distribuciones; uniforme, exponencial y Cowan M3. De seleccionarse alguna de estas tendrán que ingresarse sus parámetros mediante los formularios que se desplegarán. Los datos requeridos son similares a los solicitados en el módulo buses, pero con información centrada en los pasajeros.

3.5.5 Entrega de resultados

El modelo permite ver diversos resultados, estos son consultados al usuario mediante un formulario desplegado automáticamente como lo muestra la Figura 3.6. Se encuentran agrupados en cuatro grupos principales; estadísticas generales, información de buses, información de pasajeros e información sobre la cola de buses. Los ítems mencionados están disponibles para el primer y segundo paradero según la necesidad.

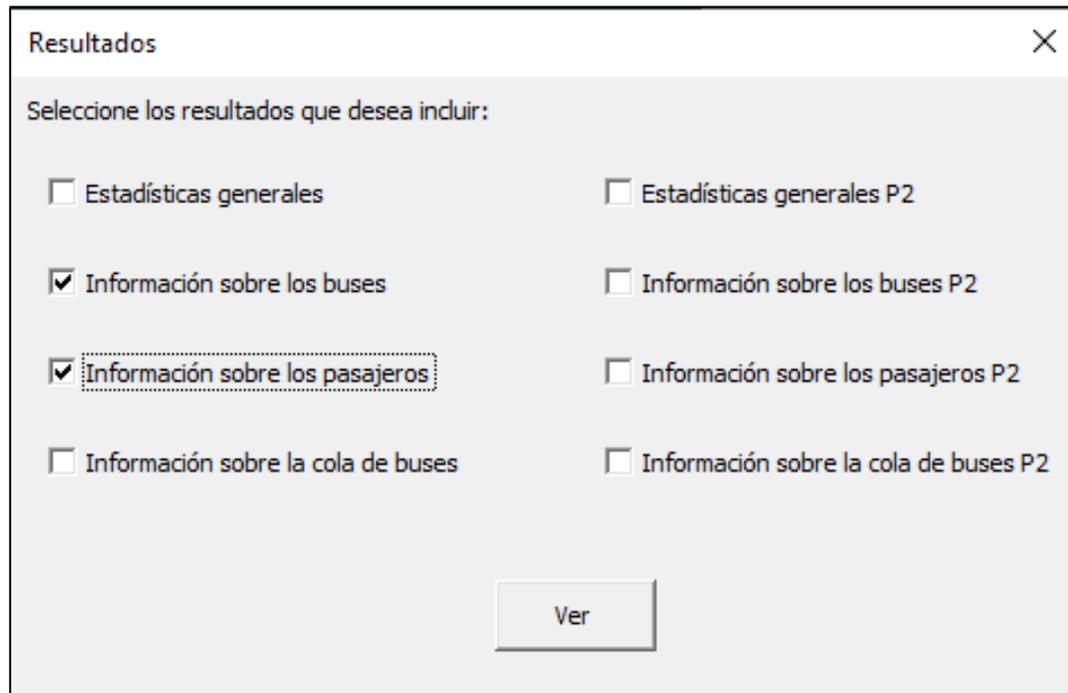


Figura 3.6. Resultados ofrecidos por PASSION K.

Estadísticas generales:

- Nombre de la simulación
- Número de rutas usando el paradero
- Sitios de detención y disciplina de salida
- Tiempo simulado
- Flujo de buses durante el periodo simulado y desviación estándar
- Demanda de embarque del paradero y desviación estándar
- Demanda de bajada en el paradero
- Condición de salida
- Espera promedio por pasajero, máximo y desviación estándar)
- Pasajeros promedio en andén, máximo

- Demora promedio por transferencia por bus, máximo y desviación estándar
- Demora extra promedio por bus, máximo y desviación estándar
- Demora en cola promedio por bus, máximo y desviación estándar
- Demora total promedio por bus, máximo y desviación estándar
- Capacidad del paradero y grado de saturación
- Largo promedio en cola por bus y máximo
- Desviación estándar en los tiempos de salida

La información respecto a los buses entrega resultados con una estética muy similar a la presentada por el módulo buses de datos de entrada, en esta hoja es posible encontrar los siguientes datos específicos para cada bus.

- a) Id. Bus P1: Indica el número del bus respecto a su orden de llegada al paradero uno (o dos), dependiendo de si se están viendo la información de buses del paradero uno o dos.
- b) Identificación ruta: Se especifica la línea a la cual corresponde cada bus.
- c) Tiempo de llegada del bus: En esta columna se indica el tiempo en el cual el bus llega al paradero [s].
- d) Suben: Esta columna de datos señala el número de pasajeros que subieron a cada bus que paso al paradero en cuestión.
- e) Bajan: Muestra la cantidad de pasajeros que bajan en el paradero para cada bus de la simulación que paso al paradero en cuestión.
- f) En plataforma: Indica la cantidad de pasajeros que se encontraban en el paradero a la llegada de cada bus esperando para abordar un bus, considera el total encontrado sin importar la línea que cada uno esperaba.
- g) Cola: Especifica el número de buses en cola para ingresar al paradero para cada bus.
- h) Demora en cola: Cuantifica la cantidad de tiempo que el bus estuvo esperando en cola para ingresar al paradero.
- i) Demora por pasajeros: Es la suma de tiempo por la subida/bajada de pasajeros con el tiempo asociado a la apertura y cierre de puertas.
- j) Demora extra: Tiempo extra que el bus estuvo detenido en el paradero, asociado a la condición de salida especificada al inicio de la simulación.

- k) Demora total: Tiempo total que el bus utiliza en el paradero desde la posible espera para entrar al paradero hasta que logra salir de él.
- l) Salida: Tiempo en el cual el bus logró salir del paradero.
- m) T.Bajada: Tiempo medio de bajada por pasajero del bus.
- n) Capacidad del bus: Capacidad del bus al salir del paradero.
- o) Cantidad de puertas: Es el número de puertas que utiliza cada bus para la transferencia de pasajeros.
- p) Id. Bus Tramo: Dado que el modelo realiza un filtrado del moduló de buses, seleccionando solo aquellos que deben pasar al paradero, este número especifica la identificación del bus respecto al módulo de buses que son los buses que pasan en el tramo simulado.

Id. Bus P1	Ruta	Llegada [s]	Suben [pax]	Bajan [pax]	En plataforma [pax]	Cola [bus]	Demora en cola [s]	Demora por pasajeros [s]	Demora extra [s]	Demora total [s]	Salida [s]	T. bajada [s]	Capacidad del bus [pax]	Puertas	Id. Bus Tramo
1	53	156	0	1	0	0	0	4	0	10	165.6	2	36	2	4
2	72	242	1	0	1	0	0	4	0	10	251.6	0	34	2	7
3	81	383	0	1	0	0	0	3	0	9	391.6	1	36	2	8
4	83	490	0	1	0	0	0	4	0	10	499.6	2	36	2	11
5	52	646	0	1	1	0	0	4	0	10	655.6	2	36	2	14
6	51	650	0	2	1	0	0	6	0	12	661.6	2	37	2	15
7	11	773	2	0	2	0	0	6	0	12	784.6	0	33	2	18
8	53	907	0	1	0	0	0	4	0	10	916.6	2	36	2	22
9	72	1191	0	2	1	0	0	6	0	12	1202.6	2	37	2	29
10	13	1262	0	2	1	0	0	4	0	10	1271.6	1	37	2	32
11	81	1368	1	3	1	0	0	8	0	13.6	1381.6	2	37	2	34
12	12	1651	0	1	0	0	0	4	0	9.6	1660.6	2	36	2	38

Figura 3.7. Ejemplo de resultados específicos de los buses de PASSION K.

Los resultados específicos para los pasajeros, se presentan en una hoja de cálculo en la cual se encuentra el detalle de cada pasajero durante la simulación. La información disponible es la siguiente:

- a) Id. Pasajero: Indica el número del pasajero respecto a su orden de llegada al paradero uno (o dos), dependiendo de si se están viendo la información de pasajeros del paradero uno o dos.
- b) Ruta: Se especifica la línea que aborda cada pasajero.

- c) Bus abordado: Se señala el bus que abordo cada pasajero, esta numeración está vinculada con Id. Bus de los resultados específicos para los buses.
- d) Llegada: En esta columna se indica el tiempo en el cual el pasajero llega al paradero [s].
- e) Espera: Se indica el tiempo que espero cada pasajero en el paradero para subirse al bus.
- f) Tiempo en subir: Corresponde al tiempo que tarda cada pasajero en subir al bus una vez que este se encuentra detenido y ha abierto las puertas.

Id. Pasajero	Ruta	Bus abordado	Llegada [s]	Espera [s]	Tiempo en subir [s/pax]
1	1	2	35	25	2
2	1	3	69	19	2
3	1	5	105	11	2
4	1	6	135	18	2
5	1	6	150	3	2
6	1	8	179	12	2
7	1	9	215	15	2
8	1	9	224	6	2
9	1	9	230	0	2
10	1	10	255	9	2
11	1	10	256	8	2
12	1	12	268	18	2
13	1	13	293	34	2
14	1	13	297	30	2
15	1	13	301	26	2
16	1	13	311	16	2
17	1	13	325	2	2
18	1	14	345	20	2

Figura 3.8. Ejemplo de resultados específicos para los pasajeros de PASSION K.

El último apartado de resultados corresponde al de la información de la cola de buses, la cual igualmente se encuentra en una hoja de cálculo. Esta hoja entrega la siguiente información específica de la cola de buses:

- a) Cola: Indica el número de buses en cola.
- b) Frecuencia: Corresponde al valor porcentual de la frecuencia durante la simulación en que se encontró la cantidad de buses en cola asociados.

- c) Tiempo en cola: Es la cantidad de tiempo promedio que los buses estuvieron en el tipo de cola asociado.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Capítulo 4. Resultados y discusión

La validación del nuevo software desarrollado se busca lograr mediante la comparación de los resultados que este logra obtener frente a datos reales de terreno de la ciudad de Temuco, Chile. Estos datos son obtenidos de la base de datos creada mediante la investigación previa “INI4-02 Herramienta de modelación de la circulación de transporte público” (Anexo A.1). La información que recoge la base de datos es del mes de septiembre del 2020 y está fuertemente influenciada por la el contexto de pandemia por Covid-19 y todas las restricciones a la libre circulación impuestas.

Los principales datos que se buscan comparar y se encuentran disponibles en la base de datos corresponden a la información de los tiempos de permanencia (Tiempo desde la llegada al paradero hasta la salida) y salida para cada bus, tanto del paradero uno como del paradero dos. Es importante mencionar que estos datos de terreno fueron recolectados en paraderos continuos separados por un semáforo, de forma simultánea y sincronizada, para tener una mayor exactitud de los datos.

Adicionalmente se realizan simulaciones de experimentación utilizando sets de datos de la validación realizando variaciones en el ciclo del semáforo, de tal forma de ver la influencia de este en los tiempos de permanencia de los buses. Este experimento también se realiza con datos generados por las distribuciones incluidas en el modelo. Por último, se ve la influencia de la ubicación del paradero respecto al semáforo en los tiempos de llegada al paradero dos y la capacidad del paradero.

4.1 Validación

Con el fin de validar las nuevas capacidades del modelo se utilizan cuatro sets de datos disponibles, seleccionados por sus características físicas y operativas, principalmente descartando otros pares en donde se registran elevados tiempos de detención asociados a conductas de conductores que esperan la llegada de pasajeros para abandonar el paradero. Los sets de datos son de dos diferentes pares de paraderos de la ciudad de Temuco. El primer par corresponde al ubicado en Diego Portales con General Pedro Lagos, tiene su primer paradero con la salida del paradero limitada por el semáforo. El segundo par corresponde al ubicado en Avenida Alemania con Dinamarca y no tiene la

salida del primer paradero limitada por el semáforo, pero si influye este en la llegada de los buses al paradero dos.

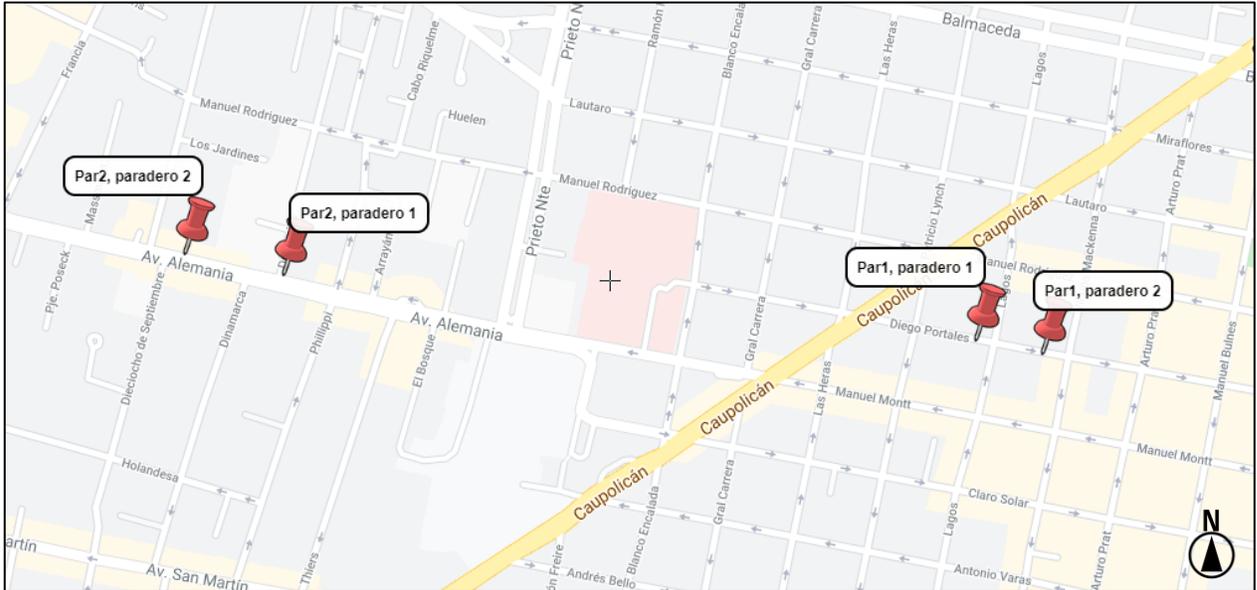


Figura 4.1. ubicación geográfica de los pares de paraderos utilizados para la validación, Temuco.

Estos casos de estudio fueron elegidos pues permiten validar las principales incorporaciones del modelo, es decir simular dos paraderos continuos separados por un semáforo, considerar el caso cuando el primer paradero está en la esquina de la cuadra y cuando se encuentra en una zona intermedia.

Estas mediciones corresponden a periodos de aproximadamente 30 min, en donde se llevó registro de todo bus percibido en las pistas con el sentido de circulación de los paraderos. De esta forma le queda al modelo la misión de seleccionar de este flujo de buses aquellos que han de pasar a cada paradero para luego comparar los resultados con lo observado.

4.1.1 Diego Portales con General Pedro Lagos: Set de datos 1.

El primer conjunto de datos para validar el modelo corresponde a los del par de Diego Portales con General Pedro Lagos. Según la Base de datos estos fueron medidos el día 03/09/2020 entre las 9:45 a.m. y las 10:15 a.m. La información General usada para la simulación se puede ver en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Información General usada para simular el primer set de datos.

Variable	Valor
Duración Total de la simulación	31 [min]
Tiempo de despeje entre buses	5.6 [s]
Tiempo muerto por bus	2 [s]
Cantidad de sitios de detención para buses	3
Disciplina de salida	FIAO
Módulo de salida P1	Semáforo
Ciclo Semáforo	68 [seg]
% tiempo del ciclo en rojo	50%
Inicio de verde	55 [s]
Distancia de P1 a semáforo 1 ojo posible	0 [m]
Distancia entre paraderos	111.56 [m]
Velocidad media en el arco	40 [km/h]

El módulo de buses utilizado junto al moduló de pasajeros de ambos paraderos se pueden encontrar en los Anexos B.1, B.2 y B.3 respectivamente.

A continuación, se muestran resultados y su comparación frente a lo medido de cada bus.

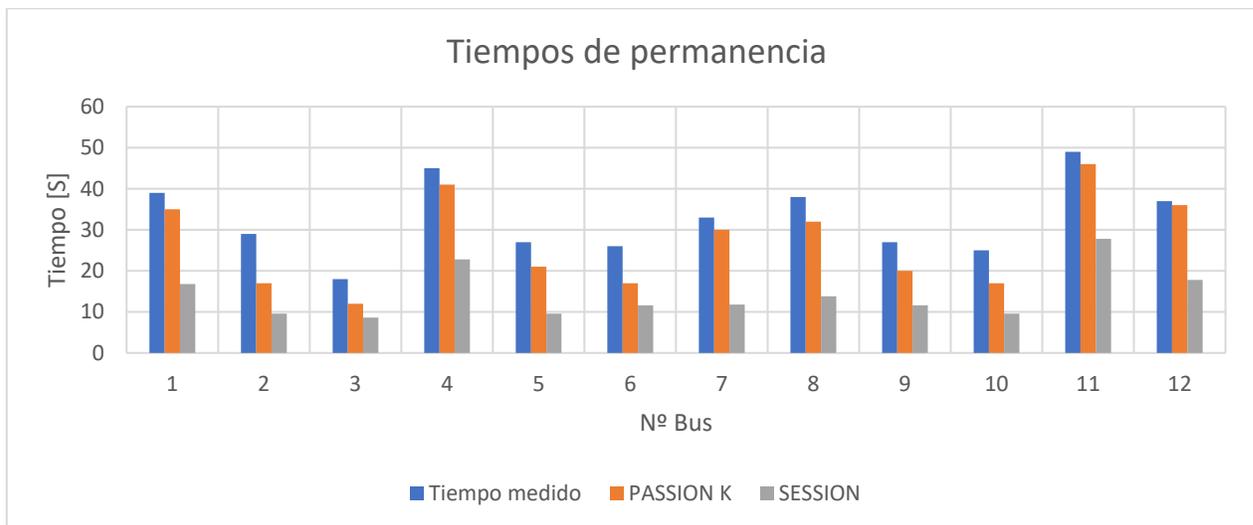


Figura 4.2. Comparación de tiempos de permanencia del paradero uno, set de datos 1.

Tabla 4.2. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de permanencia para del paradero uno, set de datos 1.

Nº Bus	Tiempos de permanencia [s]			Diferencias porcentuales con lo medido [%]	
	Medido	PASSION K	SESSION	PASSION K	SESSION
1	39	35	16.8	10.26	56.92
2	29	17	9.6	41.38	66.90
3	18	12	8.6	33.33	52.22
4	45	41	22.8	8.89	49.33
5	27	21	9.6	22.22	64.44
6	26	17	11.6	34.62	55.38
7	33	30	11.8	9.09	64.24
8	38	32	13.8	15.79	63.68
9	27	20	11.6	25.93	57.04

N° Bus	Tiempos de permanencia [s]			Diferencias porcentuales con lo medido [%]	
	Medido	PASSION K	SESSION	PASSION K	SESSION
10	25	17	9.6	32.00	61.60
11	49	46	27.8	6.12	43.27
12	37	36	17.8	2.70	51.89
Diferencia promedio (%)				20.19	57.24

Los tiempos de permanencia de los resultados obtenidos, corresponden al tiempo total que el bus se encuentra en el paradero uno en este caso. Estos resultados comparan los resultados de la nueva versión y SESSION con lo medido en terreno. PASSION K logra las menores diferencias en promedio (20.19%) frente a SESSION (57.24%) para este set de datos.

Una situación que se puede observar en la Figura 4.2 es que ambos modelos han subestimado el tiempo de permanencia para todos los buses. Esto sugiere que existe otro factor, fuera de los procesos modelados, que hace que los buses tarden un par de segundos más. Este tipo de demoras extras pueden ser asociados a la conducta del conductor o a las facilidades que tiene el bus en el momento de salir para incorporarse al flujo normal de la vía.

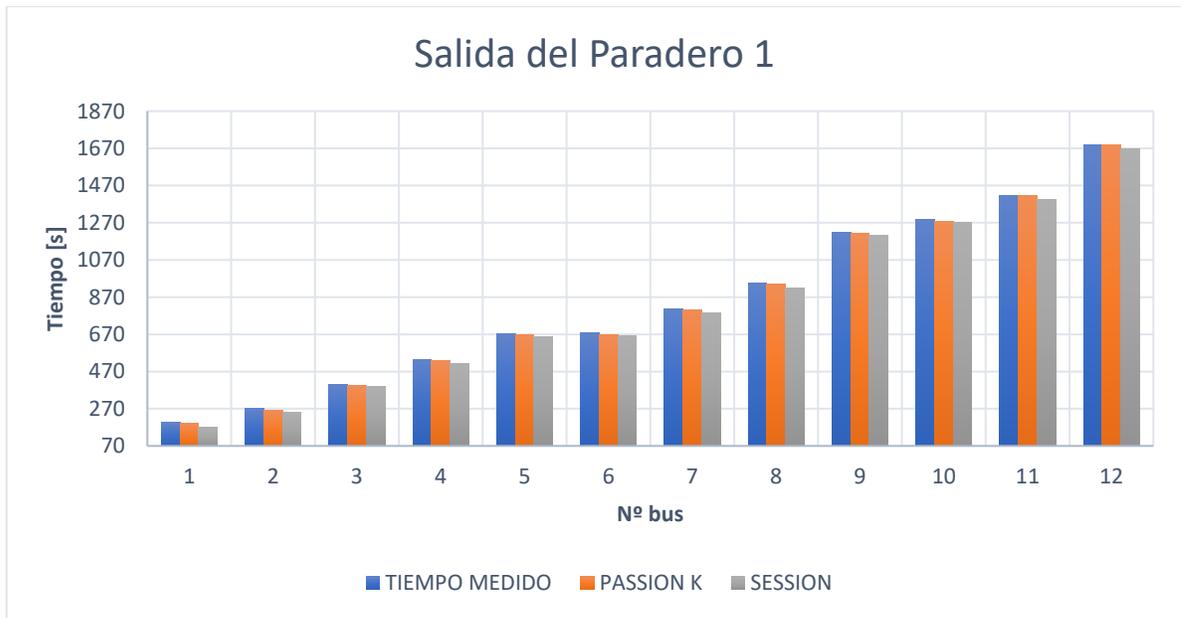


Figura 4.3. Comparación en los tiempos de salida del paradero uno por bus para el set de datos 1.

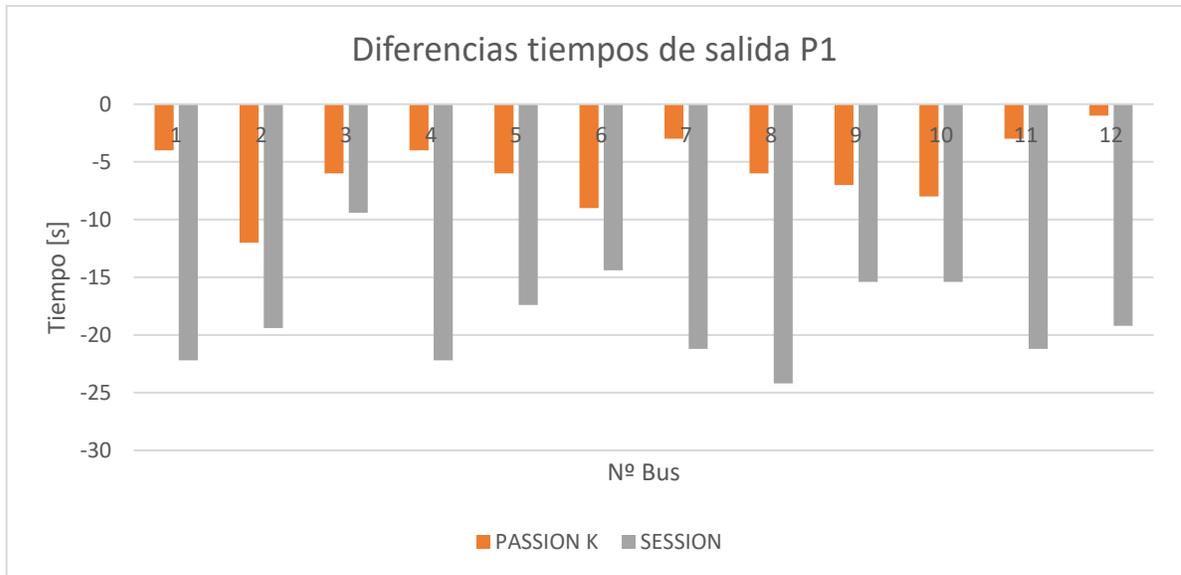


Figura 4.4. Diferencias en los tiempos de salida con lo medido, del paradero uno para el set de datos 1.

Tabla 4.3. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de salida del paradero uno, set de datos 1.

Nº Bus	Tiempo de salida [s]			Diferencias porcentuales con lo medido [%]	
	Medido	PASSION K	SESSION	PASSION K	SESSION
1	195	191	172.8	2.05	11.38
2	271	259	251.6	4.43	7.16
3	401	395	391.6	1.50	2.34
4	535	531	512.8	0.75	4.15
5	673	667	655.6	0.89	2.59
6	676	667	661.6	1.33	2.13
7	806	803	784.8	0.37	2.63
8	945	939	920.8	0.63	2.56
9	1218	1211	1202.6	0.57	1.26
10	1287	1279	1271.6	0.62	1.20
11	1418	1415	1396.8	0.21	1.50
12	1688	1687	1668.8	0.06	1.14
Diferencia Promedio (%)				1.12	3.34

La salida del paradero uno sugiere de igual forma un muy buen ajuste para la nueva versión desarrollada, manteniendo la diferencia observada en los tiempos de permanencia, es decir los modelos sugieren que los buses salen del paradero un par de segundos antes de lo medido (Figura 4.4).

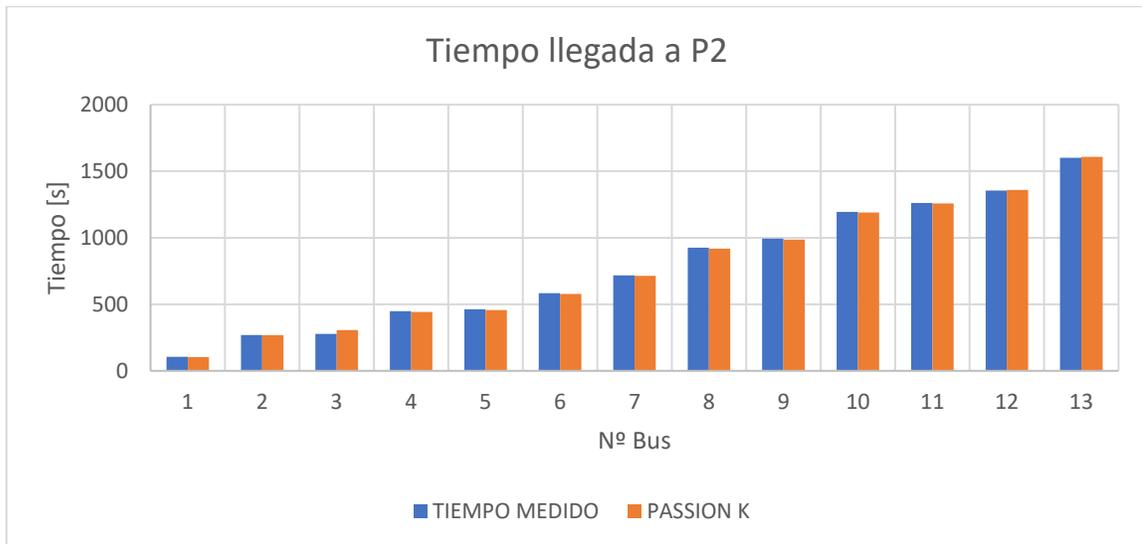


Figura 4.5. Comparación en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 1.

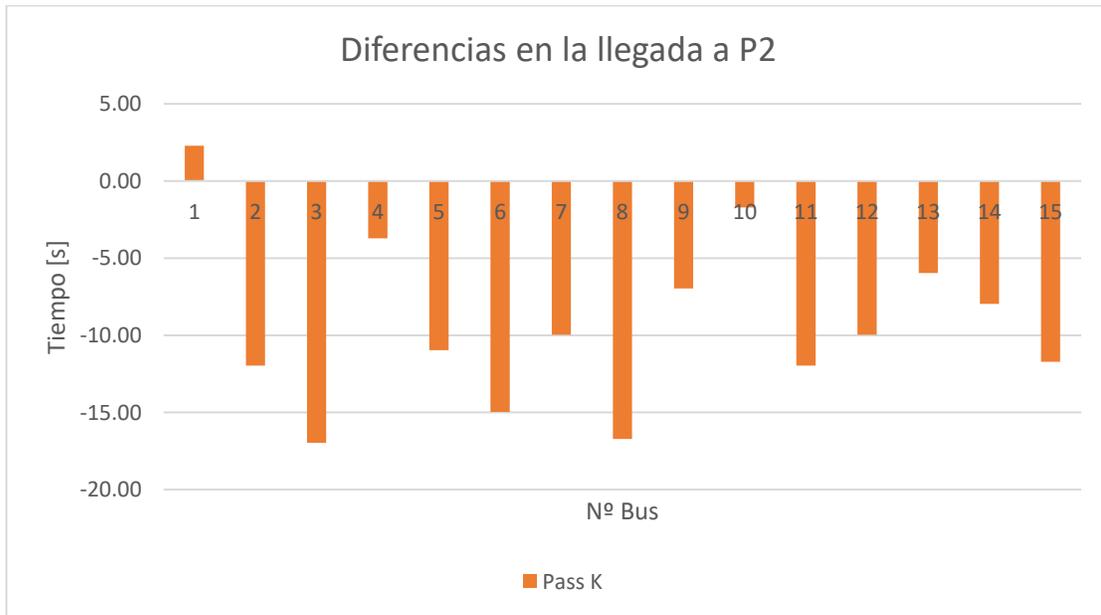


Figura 4.6. Diferencias en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 1.

Tabla 4.4. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de llegada del paradero dos, set de datos 1.

N° bus	Tiempos de llegada al paradero dos [s]		Diferencia (%)
	Tiempo medido	PASSION K	
1	78	80.28	2.92
2	213	201.04	5.61
3	286	269.04	5.93
4	633	629.28	0.59
5	688	677.04	1.59
6	692	677.04	2.16
7	959	949.04	1.04
8	975	958.28	1.71
9	1160	1153.04	0.60
10	1245	1243.28	0.14
11	1301	1289.04	0.92
12	1639	1629.04	0.61
13	1703	1697.04	0.35
14	1773	1765.04	0.45
15	1786	1774.28	0.66
Diferencia promedio (%)			1.69

Como se puede apreciar en la Figura 4.5 en donde se muestra la llegada de buses al paradero dos, no se señala información respecto a la simulación de SESSION, esto debido a que al utilizar SESSION el resultado para los buses interactuando en el paradero dos serían los mismos que en el paradero uno, es decir aparecerían los mismos 12 buses. PASSION K por su parte ha seleccionado del módulo de buses compuesto de 44 buses, que solamente 12 y 15 buses interactúan con el paradero uno y dos respectivamente.

4.1.2 Diego Portales con General Pedro Lagos: Set de datos 2.

El segundo conjunto de datos para validar el modelo corresponde a los del par de Diego Portales con General Pedro Lagos. Según la Base de datos estos fueron medidos el día 02/09/2020 entre las 11:30 a.m. y las 12:00 a.m. La información General usada para la simulación se puede ver en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Información General usada para simular el segundo set de datos.

Variable	Valor
Duración Total de la simulación	31 [min]
Tiempo de despeje entre buses	5.4 [s]
Tiempo muerto por bus	2 [s]
Cantidad de sitios de detención para buses	3
Disciplina de salida	FIAO
Módulo de salida P1	Semáforo
Ciclo Semáforo	68 [seg]
% tiempo del ciclo en rojo	50%
Inicio de verde	92 [s]
Distancia de P1 a semáforo 1 ojo posible	0 [m]
Distancia entre paraderos	111.56 [m]
Velocidad media en el arco	40 [km/h]

El módulo de buses utilizado junto al moduló de pasajeros de ambos paraderos se pueden encontrar en los Anexos C.1, C.2 y C.3 respectivamente.

A continuación, se muestran resultados y su comparación frente a lo medido de cada bus.

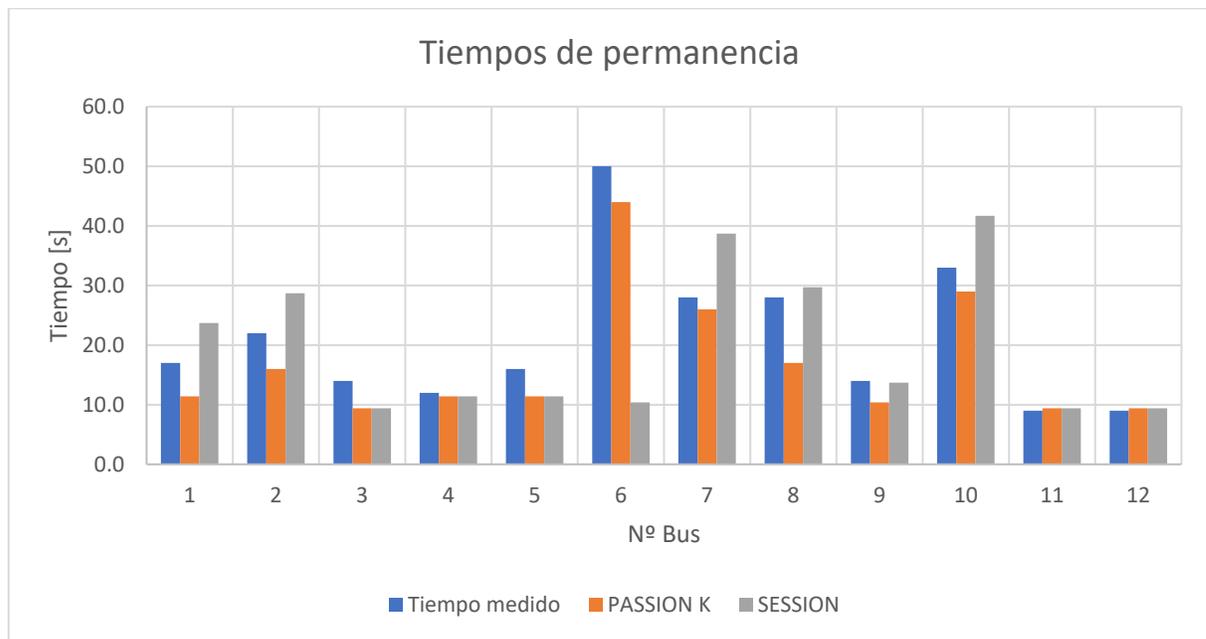


Figura 4.7. Comparación de tiempos de permanencia del paradero uno, set de datos 2.

Tabla 4.6. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de permanencia para del paradero uno, set de datos 2.

Nº Bus	Tiempos de permanencia [s]			Diferencias porcentuales con lo medido [%]	
	Medido	PASSION K	SESSION	PASSION K	SESSION
1	17.0	11.4	23.7	32.94	39.41
2	22.0	16	28.7	27.27	30.45
3	14.0	9.4	9.4	32.86	32.86
4	12.0	11.4	11.4	5.00	5.00
5	16.0	11.4	11.4	28.75	28.75
6	50.0	44	10.4	12.00	79.20
7	28.0	26	38.7	7.14	38.21
8	28.0	17	29.7	39.29	6.07
9	14.0	10.4	13.7	25.71	2.14
10	33.0	29	41.7	12.12	26.36

Nº Bus	Tiempos de permanencia [s]			Diferencias porcentuales con lo medido [%]	
	Medido	PASSION K	SESSION	PASSION K	SESSION
11	9.0	9.4	9.4	4.44	4.44
12	9.0	9.4	9.4	4.44	4.44
Diferencia promedio (%)				19.33	24.78

Los resultados del segundo set de datos para los tiempos de permanencia, muestran un mejor ajuste con la nueva versión, pero manteniendo el comportamiento del primer set de datos. Este comportamiento corresponde a una ligera subestimación de los tiempos de permanencia. SESSION sin embargo subestima varios tiempos de permanencia, y obtiene mejores resultados en promedio (24.78%) que en el set de datos anterior.

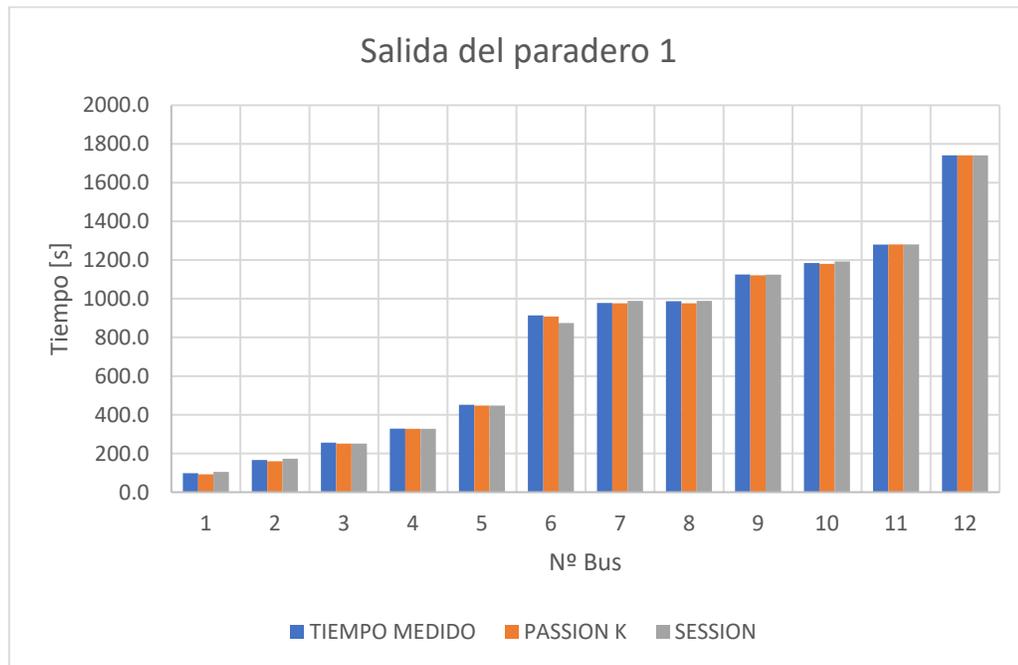


Figura 4.8. Comparación en los tiempos de salida del paradero uno por bus para el set de datos 2.

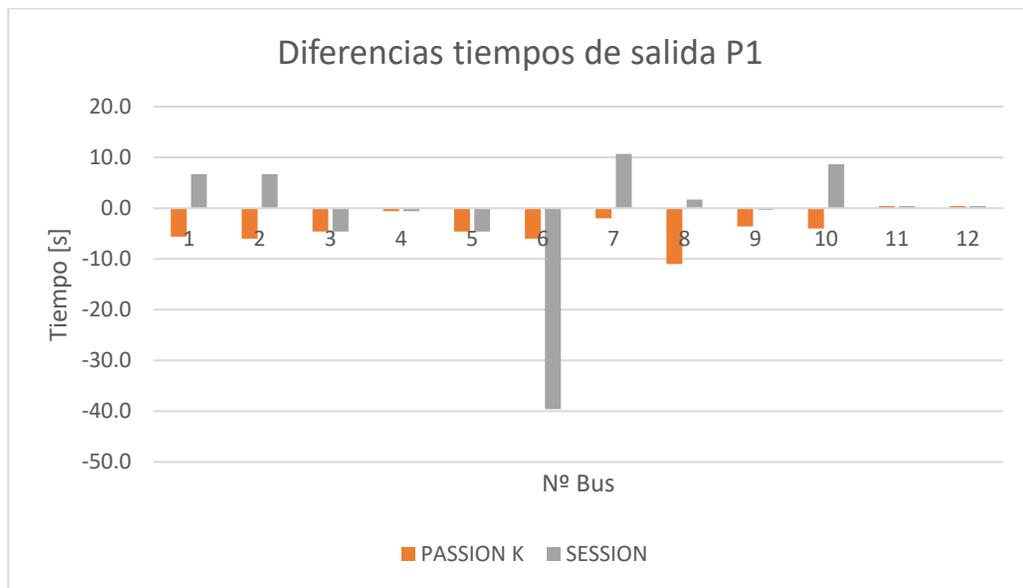


Figura 4.9. Diferencias en los tiempos de salida con lo medido, del paradero uno para el set de datos 2.

Tabla 4.7. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de salida del paradero uno, set de datos 2.

Nº Bus	Tiempo de salida [s]			Diferencias porcentuales con lo medido [%]	
	Medido	PASSION K	SESSION	PASSION K	SESSION
1	98.0	92.4	104.7	5.71	6.84
2	166.0	160.0	172.7	3.61	4.04
3	256.0	251.4	251.4	1.80	1.80
4	328.0	327.4	327.4	0.18	0.18
5	452.0	447.4	447.4	1.02	1.02
6	914.0	908.0	874.4	0.66	4.33
7	978.0	976.0	988.7	0.20	1.09
8	987.0	976.0	988.7	1.11	0.17
9	1125.0	1121.4	1124.7	0.32	0.03
10	1184.0	1180.0	1192.7	0.34	0.73

Nº Bus	Tiempo de salida [s]			Diferencias porcentuales con lo medido [%]	
	Medido	PASSION K	SESSION	PASSION K	SESSION
11	1280.0	1280.4	1280.4	0.03	0.03
12	1741.0	1741.4	1741.4	0.02	0.02
Diferencia Promedio (%)				1.25	1.69

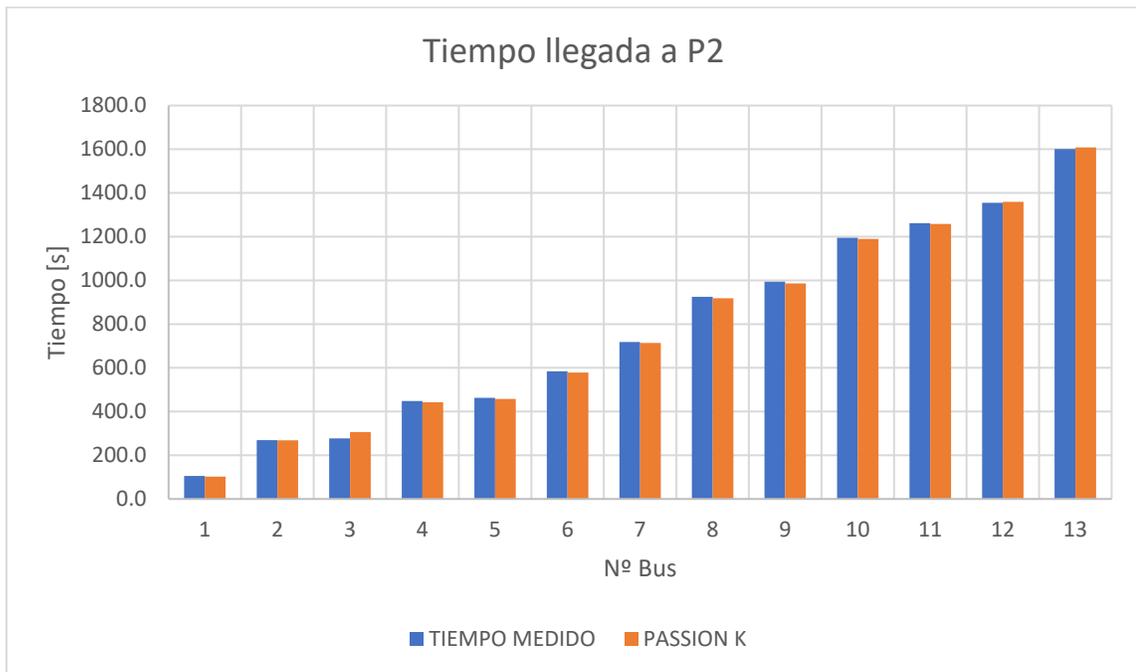


Figura 4.10. Comparación en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 2.

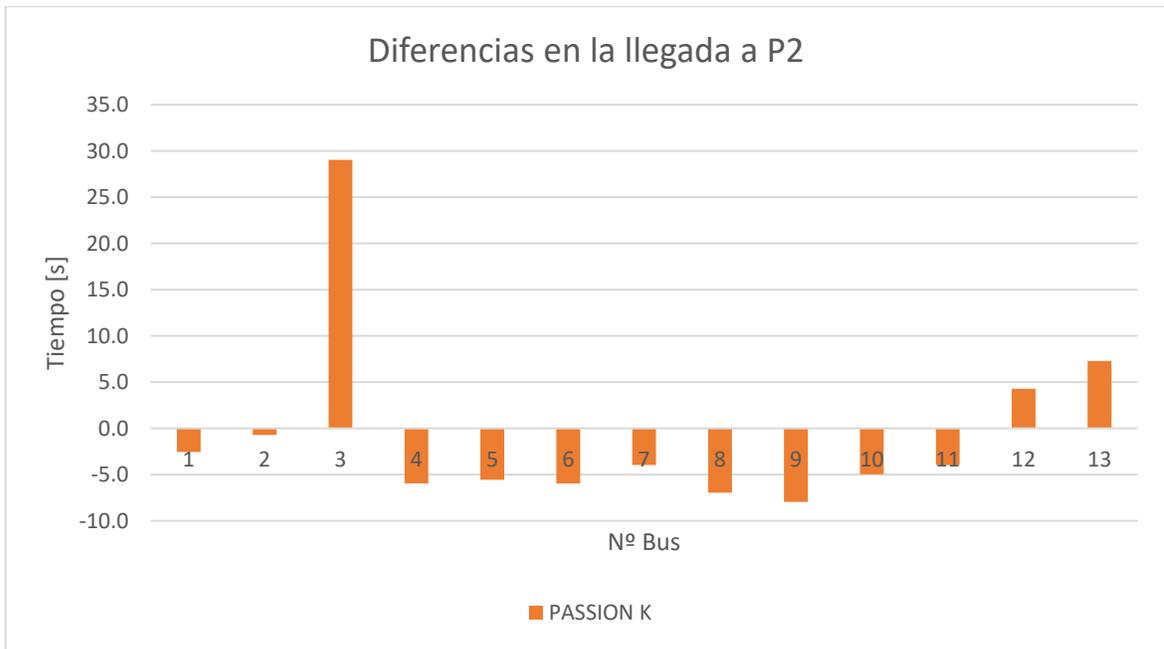


Figura 4.11. Diferencias en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 2.

Tabla 4.8. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de llegada del paradero dos, set de datos 2.

Nº bus	Tiempo medido	PASSION K	Diferencia (%)
1	105	102.44	2.44
2	269	268.28	0.27
3	277	306.04	10.48
4	448	442.04	1.33
5	463	457.44	1.20
6	584	578.04	1.02
7	718	714.04	0.55
8	925	918.04	0.75
9	994	986.04	0.80
10	1195	1190.04	0.42
11	1262	1258.04	0.31

N° bus	Tiempo medido	PASSION K	Diferencia (%)
12	1355	1359.28	0.32
13	1601	1608.28	0.45
Diferencia promedio (%) con lo medido			1.56

4.1.3 Diego Portales con General Pedro Lagos: Set de datos 3.

El tercer conjunto de datos para validar el modelo corresponde a los del par de Diego Portales con General Pedro Lagos. Según la Base de datos estos fueron medidos el día 02/09/2020 entre las 11:30 a.m. y las 12:00 a.m. La información General usada para la simulación se puede ver en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Información General usada para simular el tercer set de datos.

Variable	Valor
Duración Total de la simulación	30 [min]
Tiempo de despeje entre buses	5.4 [s]
Tiempo muerto por bus	2 [s]
Cantidad de sitios de detención para buses	3
Disciplina de salida	FIAO
Módulo de salida P1	Semáforo
Ciclo Semáforo	68 [seg]
% tiempo del ciclo en rojo	50%
Inicio de verde	22 [s]
Distancia de P1 a semáforo 1 ojo posible	0 [m]
Distancia entre paraderos	111.56 [m]
Velocidad media en el arco	40 [km/h]

El módulo de buses utilizado junto al moduló de pasajeros de ambos paraderos se pueden encontrar en los Anexos D.1, D.2 y D.3 respectivamente.

A continuación, se muestran resultados y su comparación frente a lo medido de cada bus.

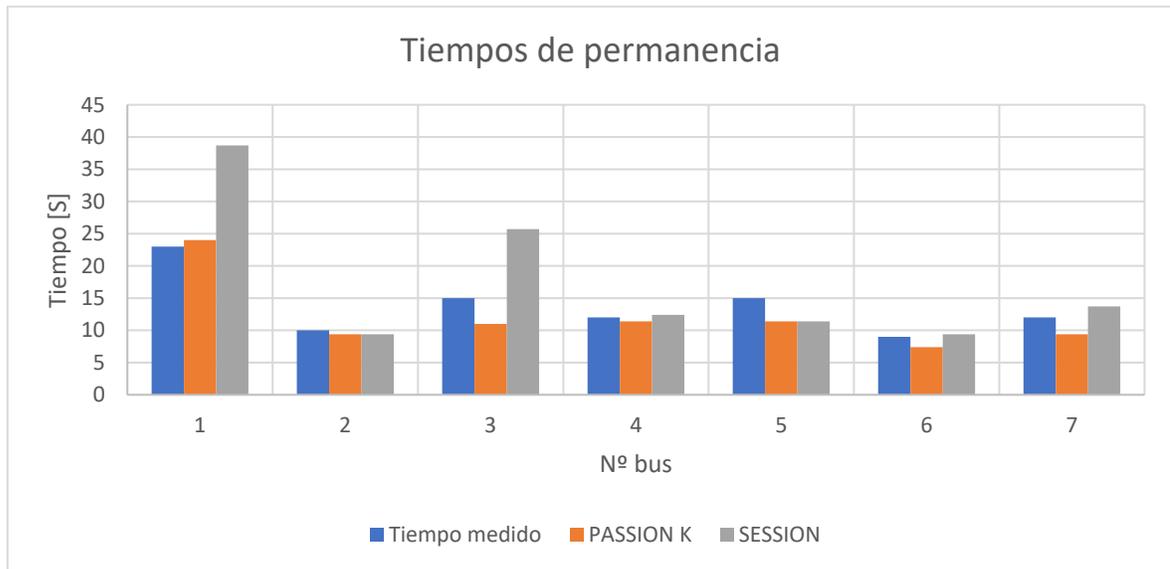


Figura 4.12. Comparación de tiempos de permanencia del paradero uno, set de datos 3.

Tabla 4.10. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de permanencia para del paradero uno, set de datos 3.

Nº Bus	Tiempos de permanencia [s]			Diferencias porcentuales con lo medido [%]	
	Medido	PASSION K	SESSION	PASSION K	SESSION
1	23	24	38.7	4.35	68.26
2	10	9.4	9.4	6.00	6.00
3	15	11	25.7	26.67	71.33
4	12	11.4	12.4	5.00	3.33
5	15	11.4	11.4	24.00	24.00
6	9	7.4	9.4	17.78	4.44
7	12	9.4	13.7	21.67	14.17
Diferencia promedio (%)				15.07	27.36

Los tiempos de permanencia obtenidos con la nueva versión tienen una tendencia a ser unos segundos inferiores a lo medido, pero igualmente tienen una mayor aproximación a la realidad frente a lo que es capaz de ofrecer SESSION. En este caso se observa además como SESSION sobrestima de forma considerable los tiempos de permanencia para el bus número uno (68.26%) y tres (71.33%), mientras que PASSION K tiene la mayor discrepancia (26.67%) con lo medido para el bus tres.

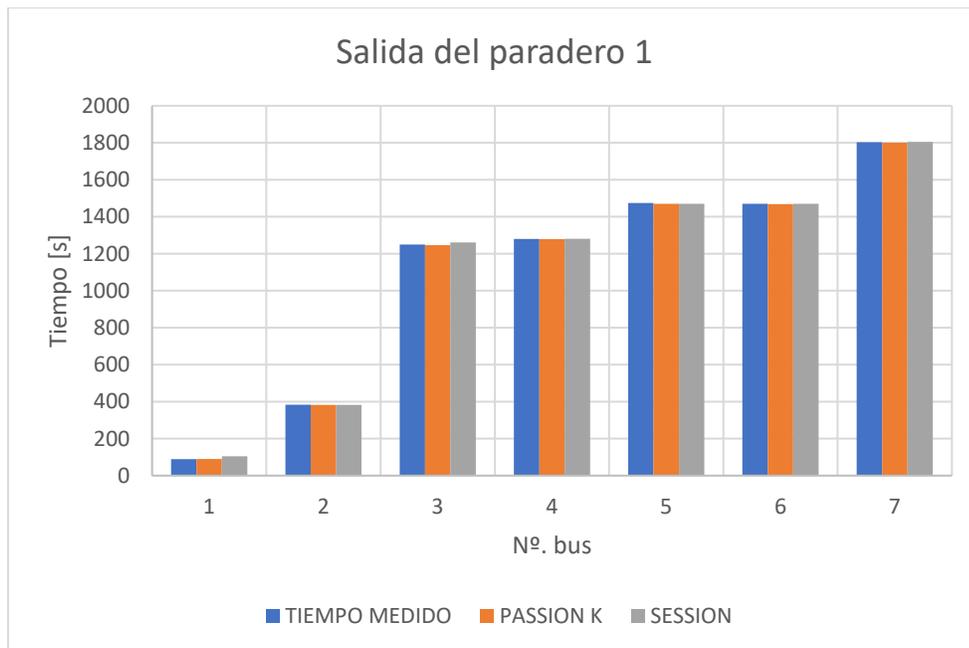


Figura 4.13. Comparación en los tiempos de salida del paradero uno por bus para el set de datos 3.

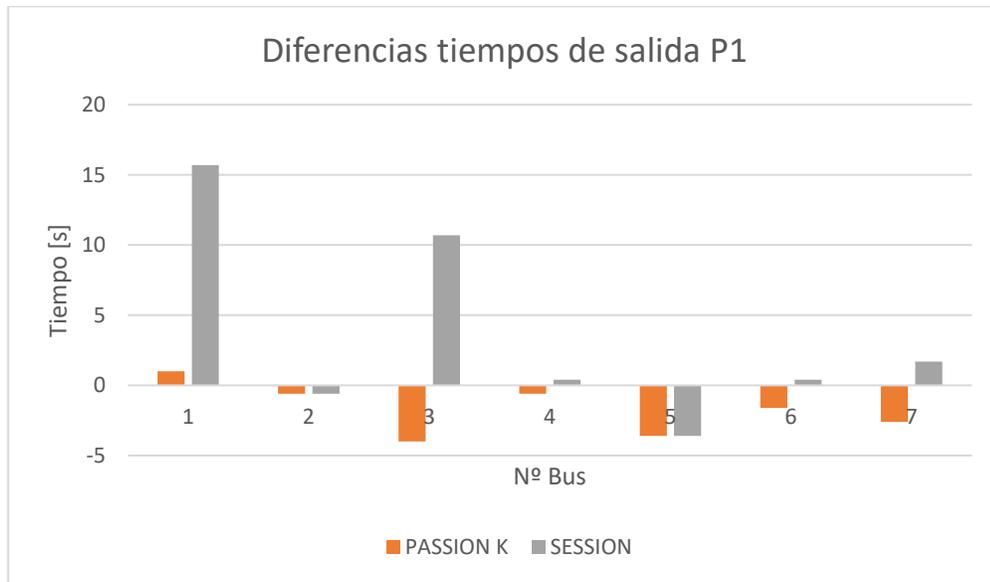


Figura 4.14. Diferencias en los tiempos de salida con lo medido, del paradero uno para el set de datos 3.

Los tiempos de salida para este set de datos y su comparación con SESSION y PASSION K muestran un muy buen ajuste para ambos modelos. La razón de esto se encuentra en que, según la base de datos, solamente dos de los siete buses registrados pasando al paradero uno encuentran bloqueada su salida por el rojo del semáforo. Estos buses son el uno y tres, que coinciden con las dos mayores diferencias estimadas. De este set de datos se desprende que es el cálculo de los tiempos asociados a demoras para salir del paradero en donde existe mayor diferencia con lo medido en terreno.

Tabla 4.11. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de salida del paradero uno, set de datos 3.

Nº Bus	Tiempo de salida [s]			Diferencias porcentuales con lo medido [%]	
	Medido	PASSION K	SESSION	PASSION K	SESSION
1	89	90.0	104.7	1.12	17.64
2	383	382.4	382.4	0.16	0.16
3	1250	1246	1260.7	0.32	0.86
4	1280	1279.4	1280.4	0.05	0.03
5	1474	1470.4	1470.4	0.24	0.24
6	1470	1468.4	1470.4	0.11	0.03
7	1803	1800.4	1804.7	0.14	0.09
Diferencia Promedio (%)				0.31	2.72

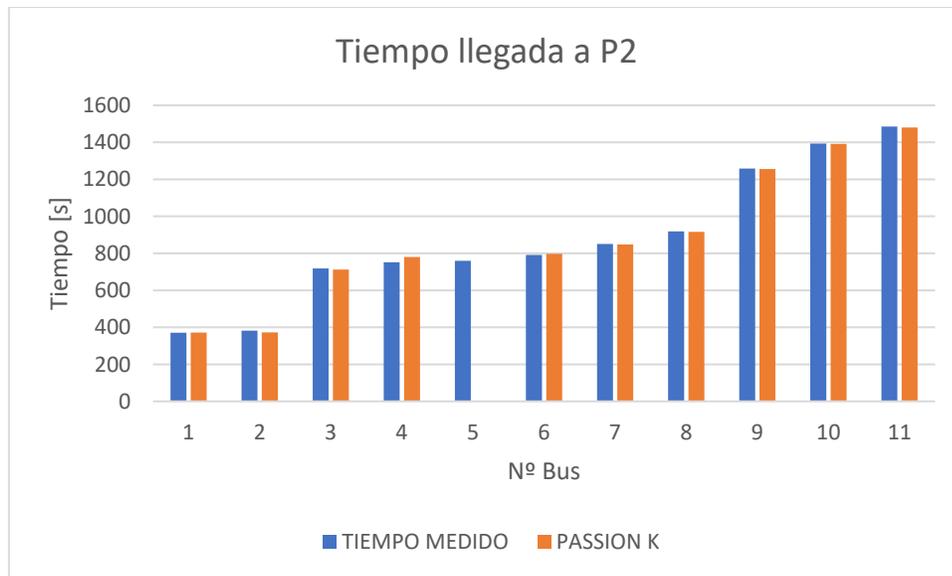


Figura 4.15. Comparación en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 3.

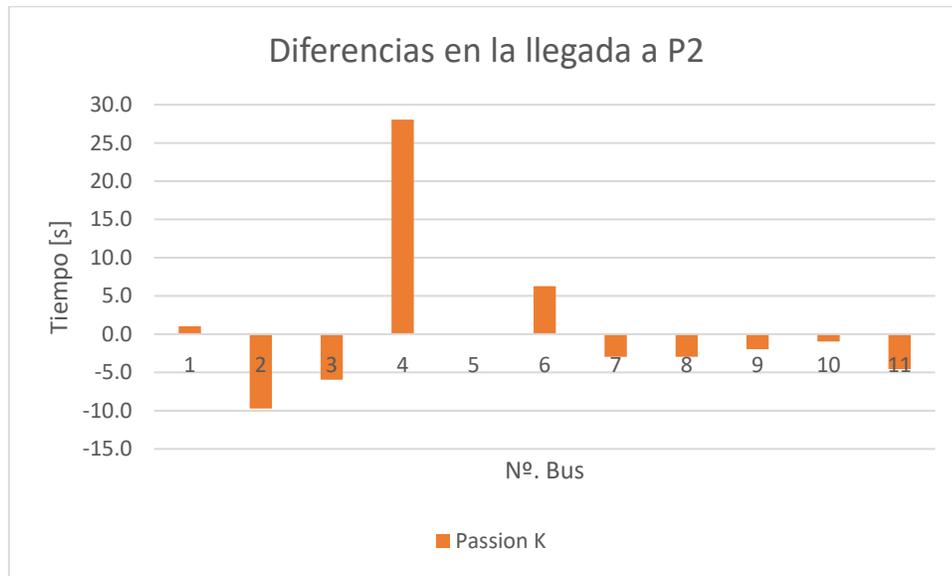


Figura 4.16. Diferencias en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 3.

Se puede ver que en la Figura 4.15 que no existe un valor entregado por la nueva versión del modelo para el bus número 5, esto es debido a que en la base de datos no existe información de este bus pasando por la vía del primer paradero, pero si existe registro que paso al paradero dos. Esto implica que el medidor del primer paradero no logro registrar el paso de este bus, algo que si pudo hacer el medidor del segundo paradero. Las causas de esta pérdida del registro de un bus suelen ocurrir en ocasiones cuando buses llegan en pelotón, de tal forma que aquellos buses que pasan por la pista más lejana al paradero uno en este caso, no son posibles de identificar para el observador ubicado en el lugar de parada.

Tabla 4.12. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de llegada del paradero dos, set de datos 3.

Nº bus	Tiempo medido	PASSION K	Diferencia (%)
1	371	372.04	0.28
2	382	372.28	2.54
3	718	712.04	0.83
4	752	780.04	3.73
5	760	-	-
6	791	797.28	0.79
7	851	848.04	0.35
8	919	916.04	0.32
9	1258	1256.04	0.16
10	1393	1392.04	0.07
11	1485	1480.44	0.31
Diferencia promedio (%) con lo medido			0.94

4.1.4 Avenida Alemania con Dinamarca: Set de datos 4.

El cuarto conjunto de datos para validar el modelo corresponde a los del par de Diego Portales con General Pedro Lagos. Según la Base de datos estos fueron medidos el día 02/09/2020 entre las 11:30 a.m. y las 12:00 a.m. La información General usada para la simulación se puede ver en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Información General usada para simular el cuarto set de datos.

Variable	Valor
Duración Total de la simulación	31 [min]
Tiempo de despeje entre buses	5.4 [s]
Tiempo muerto por bus	2 [s]
Cantidad de sitios de detención para buses	3
Disciplina de salida	FIAO

Módulo de salida P1	Semáforo
Ciclo Semáforo	84 [seg]
% tiempo del ciclo en rojo	36%
Inicio de verde	64 [s]
Distancia de P1 a semáforo 1 ojo posible	0 [m]
Distancia entre paraderos	100 [m]
Distancia al semáforo de P1 a semáforo 1	60 [m]
Velocidad media en el arco	33 [km/h]

El módulo de buses utilizado junto al moduló de pasajeros de ambos paraderos se pueden encontrar en los Anexos E.1, E.2 y E.3 respectivamente.

El cuarto set de datos tiene considerablemente menor cantidad de buses registrados a pesar de tener un periodo de medición similar a los anteriores. Su elección radica principalmente en que es de los pocos pares de paraderos de la base de datos en los cuales se da la situación de que existe una distancia considerable entre el primer paradero y el semáforo que separa ambos paraderos, constatándose que la salida del paradero es totalmente libre, y que la influencia del semáforo yace en los tiempos de llegada al paradero dos.

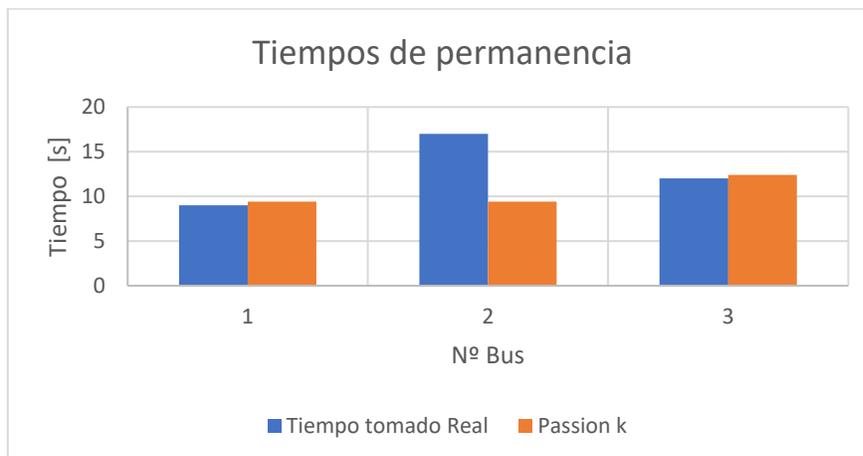


Figura 4.17. Comparación de tiempos de permanencia del paradero uno, set de datos 4.

Tabla 4.14. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de permanencia para del paradero uno, set de datos 4.

Nº Bus	Tiempo medido [s]	PASSION K [s]	Diferencia %
1	9	9.4	4.44
2	17	9.4	44.71
3	12	12.4	3.33
Diferencia promedio (%)			17.49

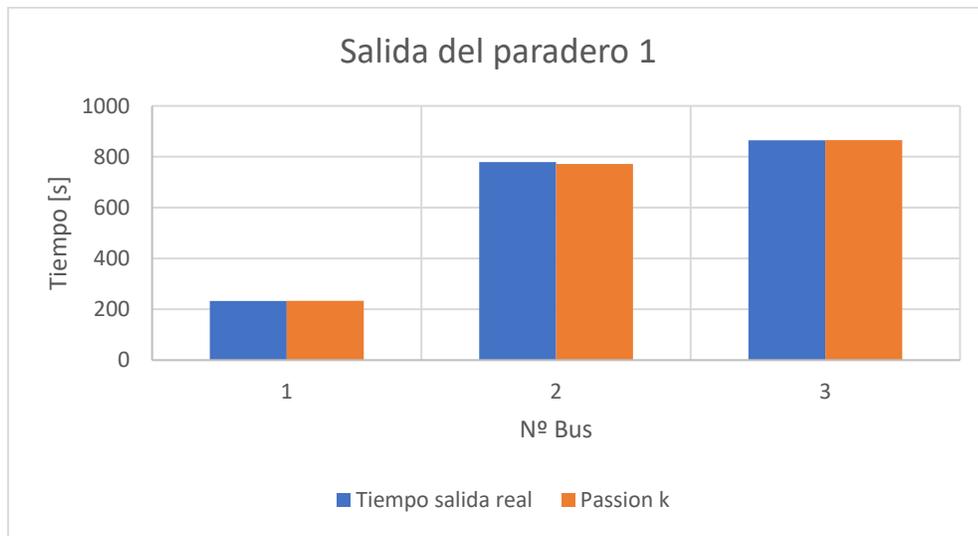


Figura 4.18. Comparación en los tiempos de salida del paradero uno por bus para el set de datos 4.

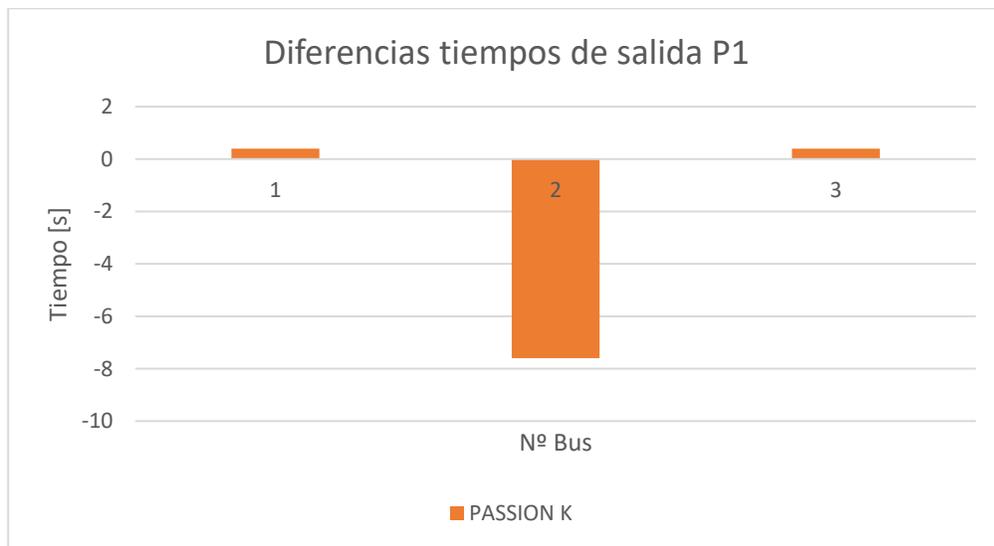


Figura 4.19. Diferencias en los tiempos de salida con lo medido, del paradero uno para el set de datos 4.

Los tiempos de permanencia y salida del paradero uno demuestran un buen ajuste entre la nueva versión y lo medido en terreno, Incluso superior a los sets de datos anteriores para los tiempos de salida del paradero uno. Es importante mencionar que la interacción en el primer paradero no considera demoras extras para salir del sitio de detención una vez finalizada la transferencia de pasajeros, pues el semáforo solamente influye en el tiempo por desplazamiento entre ambos paraderos.

Tabla 4.15. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de salida del paradero uno, set de datos 4.

N.º Bus	Tiempo medido [s]	PASSION K [s]	Diferencia %
1	233	233.40	0.17
2	779	771.40	0.98
3	865	865.40	0.05
Diferencia promedio (%)			0.4

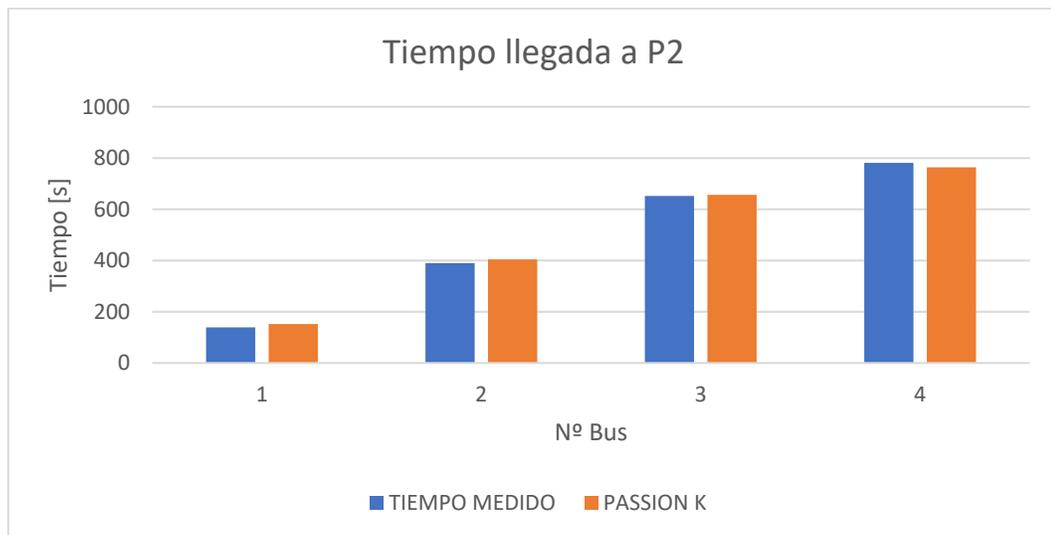


Figura 4.20. Comparación en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 4.

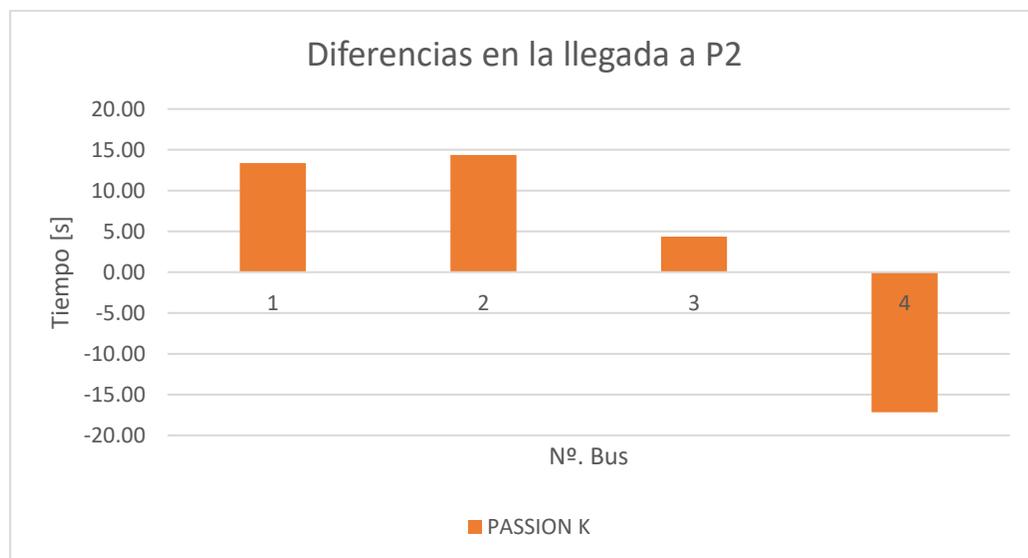


Figura 4.21. Diferencias en los tiempos de llegada de los buses al paradero dos, set de datos 4.

Tabla 4.16. Diferencias porcentuales por bus en los tiempos de llegada del paradero dos, set de datos 4.

Nº Bus	Tiempo medido [s]	PASSION K [s]	Diferencia %
1	139	152.36	9.61
2	390	404.36	3.68
3	652	656.36	0.67
4	781	763.84	2.20
Diferencia promedio (%)			4.04

La estimación de la llegada al paradero dos de los buses que interactúan en él, muestra una gran similitud con lo medido en terreno, sin embargo, la diferencia promedio (4.04%) es superior a todos los sets de datos anteriores. Se podría decir que esta disparidad se produce en el semáforo que opera entre ambos paraderos, pues la salida y tiempos de permanencia se mantienen en rangos similares a los casos anteriores. A pesar de esto la diferencia aun es pequeña y el ajuste es bueno.

4.2 Experimentación

Completada la validación del modelo, se realizan 3 experimentos enfocados en ver el efecto de diferentes combinaciones posibles de operación sobre los tiempos de permanencia de los buses, de desplazamiento y la capacidad de los paraderos. De tal forma de buscar posibles mejoras al funcionamiento del transporte público de buses.

4.2.1 Experimento 1

El primer experimento realizado consiste en ver qué tipo de relación existe entre los tiempos de permanencia de los buses con el ciclo de semáforo adyacente, manteniendo el porcentaje de verde efectivo. Para esta experimentación se utilizaron las tres distribuciones disponibles para generar las llegadas de los buses.

Tabla 4.17. Parámetros para las simulaciones del experimento 1.

Parámetro	t_s	t_c	β_0	N_s	D_s	g/c	t_a	t_b	q	q
Valor	40	5	2	3	FIAO	0.5	2	3	60	90

Donde:

- t_s : Tiempo simulado en minutos.
- t_c : Tiempo de despeje entre buses sucesivos [s].
- N_s : Número de sitios de detención.
- β_0 : Tiempo muerto promedio por detención [s].
- D_s : Disciplina de salida (FIAO/FIFO).
- g/C : Ratio de tiempo de verde del semáforo.
- t_a : Tiempo de bajada de los pasajeros [s/pas]
- t_b : Tiempo de subida de los pasajeros [s/pas]
- q : Flujo de buses para generar datos [Bus/h]
- B : Demanda de pasajeros [pas/h].

Los resultados de esta experimentación pueden verse a continuación:

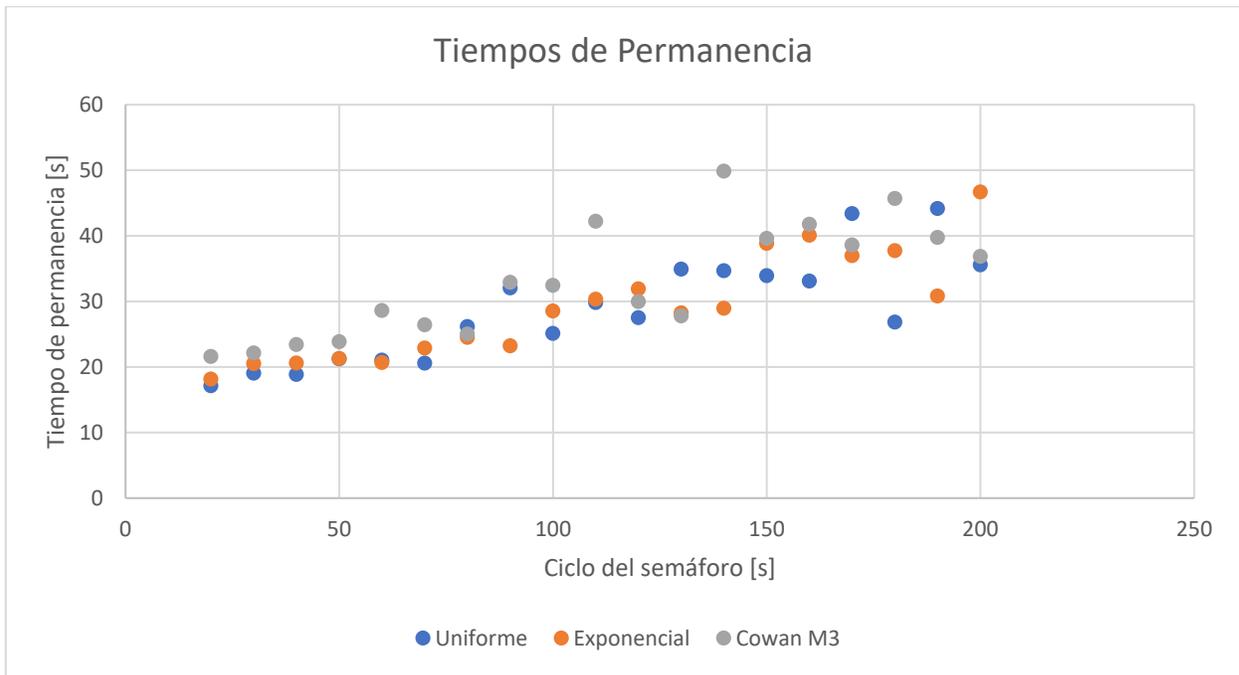


Figura 4.22. Tiempos de permanencia promedio para las tres distribuciones disponibles y su variación con el ciclo del semáforo.

Los resultados de este experimento muestran que, para las 57 simulaciones realizadas, en todas existe una tendencia al alza en los tiempos de permanencia con el aumento del ciclo del semáforo manteniendo la razón de verde. Además, puede verse que aproximadamente a ciclos inferiores a 100 [s] existe una menor variabilidad en estas demoras. Después de este límite los rangos entre máximos y mínimos para un mismo ciclo tienden a aumentarse.

4.2.2 Experimento 2

El segundo experimento efectuado estima el comportamiento de los tiempos de permanencia de los buses con la variación del ciclo del semáforo adyacente, manteniendo la razón de verde al 50%. Los datos utilizados para ver este efecto son los primeros 3 sets de datos utilizados para la validación del modelo.

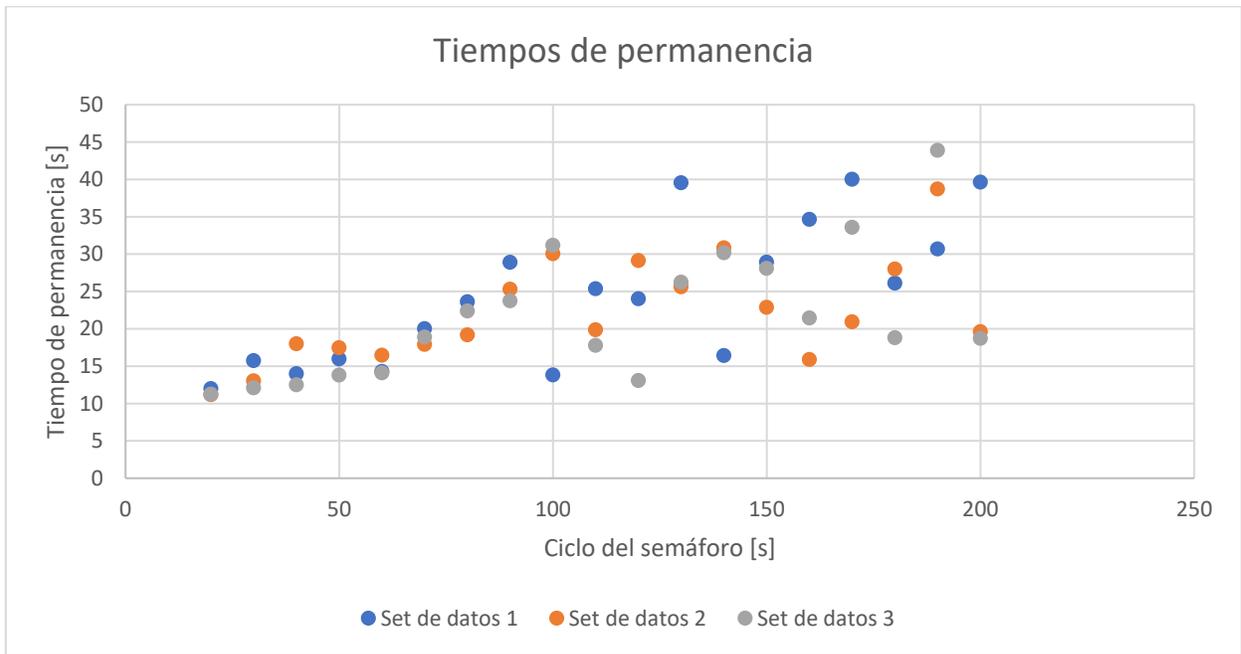


Figura 4.23. Tiempos de permanencia promedio para los tres primeros sets de datos disponibles y su variación con el ciclo del semáforo.

Los resultados del segundo experimento sugieren una tendencia similar a la vista en el primer experimento, es decir los tiempos que los buses están detenidos en el paradero aumentan con mayores ciclos del semáforo. Sin embargo, desde aproximadamente un ciclo de 100 [s], la variación de demora entre el ciclo de semáforo siguiente y el anterior para un mismo set de datos comienza a aumentar considerablemente, este efecto es atribuible a que al ser los datos de terreno menores en cantidad a los generados en el experimento 1, existen combinaciones en los cuales se favorece mucho la salida de los buses mientras que otras todo lo contrario. Esta situación planteada se ve disminuida al tener un mayor volumen de buses circulando como lo muestra el experimento 1, pero bajo las condiciones de medición en contexto de pandemia hacen imposible tener estos flujos de buses elevados.

4.2.3 Experimento 3

El último experimento realizado mediante esta memoria busca ver la influencia de la distancia del paradero al semáforo sobre la capacidad del paradero y los tiempos de llegada al paradero dos. De forma de dilucidar si existen ganancias de tiempos considerable al ubicar el paradero en partes de un tramo que no sean en la esquina próxima a una intersección. Los datos son generados mediante las tres distribuciones disponibles y la simulación utiliza los siguientes parámetros generales.

Tabla 4.18. Parámetros para las simulaciones del experimento 3.

Parámetro	t_s	t_c	β_0	N_s	D_s	g/c	t_a	t_b	q	q
Valor	90	5	2	2	FIAO	0.5	3	2	60	150

Donde:

- t_s : Tiempo simulado en minutos.
- t_c : Tiempo de despeje entre buses sucesivos [s].
- N_s : Número de sitios de detención.
- β_0 : Tiempo muerto promedio por detención [s].
- D_s : Disciplina de salida (FIAO/FIFO).
- g/C : Ratio de tiempo de verde del semáforo.
- t_a : Tiempo de bajada de los pasajeros [s/pas].
- t_b : Tiempo de subida de los pasajeros [s/pas].
- q : Flujo de buses para generar datos [Bus/h].
- B : Demanda de pasajeros [pas/h].

Los resultados de esta experimentación pueden verse a continuación:

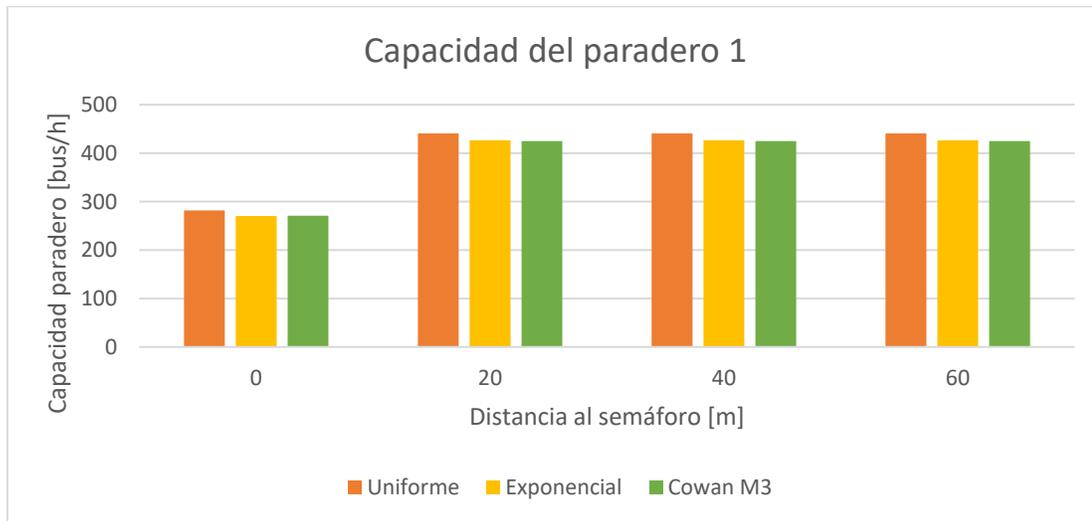


Figura 4.24. Capacidad del paradero según la distancia del paradero al semáforo.

Los resultados respecto a la capacidad del paradero uno muestra que tener un paradero ubicado en la esquina de una intersección semaforizada (0[m]) afecta de forma considerable la capacidad de este. Distancias de 20, 40 y 60 [m] obtienen la misma la capacidad, lo que deja claro que lo que realmente afecta la capacidad es si existe un semáforo limitando la salida del paradero uno, debido a que a las otras distancias los buses salen libremente del paradero hasta encontrarse con el semáforo más adelante.

El comportamiento de la capacidad coincide con el esperado en cuanto a que al estar limitada la salida del paradero uno por un semáforo, existen demoras extras asociadas que incrementan el tiempo total que el bus se encuentra detenido. Al haber una demora promedio mayor por bus, la capacidad, es decir la cantidad de buses que pueden operar en un periodo de tiempo disminuye. Situación que no ocurre cuando la salida esta libre.

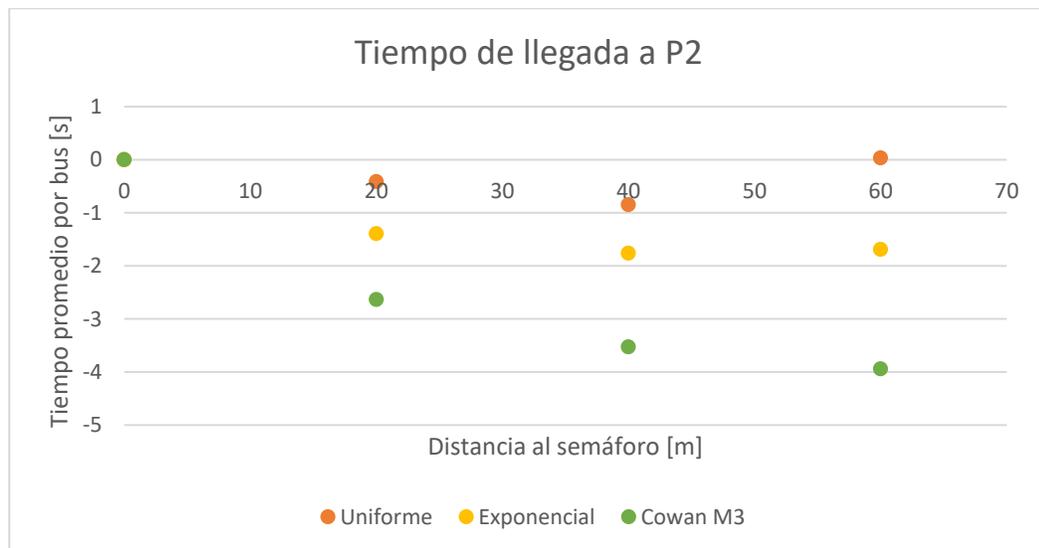


Figura 4.25. Variación del tiempo promedio de llegada por bus, respecto a una distancia de 0 [m].

Si bien la capacidad mostrada anteriormente era notoriamente influenciada por la ubicación del paradero respecto al semáforo, la posible ganancia de tiempo por bus en cuanto a su llegada al segundo paradero es menos sensible a estas configuraciones. En este sentido se lograron obtener hasta 3.9 [s] menos para una distribución Cowan m3 en donde el primer paradero se encuentra a 60 [m] del semáforo. Sin embargo, la tendencia es que las posibles ganancias en cuanto a tiempo ganado son mínimas, oscilando bajo los 2 [s] entre cada configuración.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Capítulo 5. Conclusiones

El objetivo principal que dio razón a esta tesis era extender las capacidades del software PASSION XLS para modelar dos paradas de buses consecutivas separadas por un semáforo. Esto correspondía como una continuación con la línea de desarrollo que ha llevado PASSION y que contribuye al estudio especializado en la interacción que se produce en los paraderos de buses.

El desarrollo de PASSION K desde la base de PASSION XLS ha ampliado los escenarios aplicables para la simulación, como es la modelación de dos paraderos consecutivos y distintas configuraciones de ubicación del paradero respecto a la intersección que separa a ambos. Además de optimizaciones a elementos del software como lo es el funcionamiento del semáforo.

La validación del nuevo modelo no fue un proceso sencillo principalmente a que la cantidad de datos disponibles fueron recolectados bajo estrictas restricciones a la circulación de personas por la pandemia por Covid 19 y por ende la disminución de transporte público. Esto implicaba el desarrollo de algoritmos precisos capaces de representar lo más fielmente posible el comportamiento real, debido a que una gran diferencia para un bus de diez por ejemplo tiene un gran peso sobre los valores, a comparación de uno en treinta. Este tipo de circunstancias permitió el desarrollo de mayores medidas de calibración como lo fue la incorporación de posibles desfases en la operación del semáforo.

El desarrollo en su conjunto del nuevo algoritmo del semáforo contribuye en gran medida a los buenos resultados vistos durante la validación, logrando superar en todos los casos vistos lo realizado por SESSION. Los tiempos de permanencia por ejemplo que son vistos de forma detallada para cada bus muestran un muy buen ajuste comparado con lo medido siendo en el peor de los casos de un 20.19%. Sin embargo, se impone la tendencia de que el nuevo modelo al igual que SESSION para los casos de estudio tienden a subestimar los tiempos de permanencia. La razón atribuible es que en los casos de estudio existe una pequeña cantidad de segundos, atribuible a la conducta del conductor y/o pequeñas dificultades para incorporarse al flujo vehicular, que produce la diferencia con una operación más idealizada planteada por el modelo. Este desfase de segundos

se acumula produciendo posteriormente el mismo fenómeno de tener generalmente unos segundos menos en la llegada al segundo paradero.

Respecto a la evaluación de algunos escenarios de funcionamiento de ambas paradas con el nuevo modelo. Se puede decir mediante el experimento 1, el cual realizó una cantidad considerable de simulaciones (57), que los ciclos mayores para un mismo porcentaje de verde aumentan los tiempos de permanencia de los buses. Produciendo un incremento de demoras extras para que el bus pueda salir del paradero. Este comportamiento es compartido por el experimento 2, realizado con los tres primeros sets de datos, pero observando en este una mayor variación adjudicada principalmente a la menor cantidad de datos, que produce combinaciones en donde los buses se pueden ver muy beneficiados o perjudicados por las demoras. Este tipo de consideraciones puede disminuir los tiempos de viaje del transporte público de buses. Pero tienen que ser complementadas con estudios que midan el impacto sobre el resto del tránsito y sus efectos en la red de transporte.

El experimento 3 se constituye como una forma de ver la influencia de la ubicación del primer paradero respecto al semáforo, en el marco del estudio de funcionamiento del transporte público bajo diferentes configuraciones. Mediante este se constató la notoria influencia que tiene sobre la capacidad del paradero, al estar el semáforo limitando la salida de este. Es decir que aquellos paraderos cuya salida es limitada por un semáforo disminuyen la cantidad máxima de buses que podrían operar en un periodo de tiempo. Mediante este experimento es posible recomendar la ubicación de paraderos de alta demanda a una distancia suficientemente larga de semáforo que le sigue a continuación, de tal forma que no limite su salida del primer paradero. Este tipo de circunstancias suelen ocurrir en grandes ciudades, no es algo común para la ciudad de Temuco, menos al momento de la realización de este trabajo.

Las diferentes combinaciones de distancias entre el paradero uno y el semáforo uno, no afectan en gran medida los tiempos de llegada al paradero dos obteniendo por lo general variaciones menores a 2.5 [s] promedio por bus. De esta forma se desprende que la modificación de la ubicación afecta más que nada a la capacidad que podría ofrecer el paradero. Si bien la ganancia es mínima al modificar la ubicación del paradero, existe y

podría ser considerada y evaluada, especialmente si se trata de paraderos de alto flujo de buses.

Respecto a otros softwares que pueden modelar paraderos, las principales ventajas de PASSION K son que trabaja en una plataforma de uso familiar para la mayoría de las personas como es Excel. Al ser una modelación específica de paraderos de buses la información y tiempo necesario para su configuración es menor a la mayoría de los otros softwares. Su ejecución por otra parte no requiere gran potencia de los equipos computacionales en los que se ejecuta, tardando apenas unos segundos. La mayoría de las variables involucradas en el proceso pueden ser modificadas incluso de forma individual, como es el caso de los tiempos de subida y bajada por pasajero, cantidad de pasajeros que bajan en cada parada entre otras.

A pesar de las ventajas y logros de PASSION K aún es posible mejorar y agregar más elementos a la modelación. De ser así se recomienda trabajar sobre la base establecida por las últimas versiones desarrolladas, reutilizando en gran medida el código base y las capas de desarrollo logradas. Parte de las mejoras posibles nacen de la existencia de pares de paraderos descartados en los cuales existía una condición de salida mixta. Esta era en paraderos con bahía próximos al semáforo, que compartían las pistas adyacentes con transporte privado. Al mirar las grabaciones de terreno se observaba que había momentos en los cuales no podían salir del paradero por el rojo del semáforo, mientras que en otros al haber verde en el semáforo no podían salir por tener que esperar para incorporarse a la pista adyacente. Tener una forma de estudiar estos casos mediante la modelación sería interesante.

También se podría ampliar el modelo de tal forma de considerar “n” paraderos separados cierta distancia y manteniendo diversas opciones de condiciones de salida para cada uno de ellos. Incorporar mayor información del tráfico cercano y evaluar la capacidad de las pistas adyacentes al realizar múltiples configuraciones tanto en ubicación como operación en los paraderos.

NOMENCLATURA.

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
t_d	: Tiempo de permanencia.	[s]
P_a	: Número de pasajeros que bajan por bus en un “peak” de 15 min.	-
t_a	: Tiempo de bajada de los pasajeros.	[s/pas]
P_b	: Número de pasajeros que suben por bus en un “peak” de 15 min.	-
t_b	: Tiempo de subida de los pasajeros.	[s/pas]
t_{oc}	: Tiempo por apertura y cierre de puertas del bus.	[s]
B_{bb}	: Número máximo de buses por hora.	[bus/h]
$\left(\frac{g}{C}\right)$: Cantidad de verde efectivo en un ciclo del semáforo.	-
t_c	: Tiempo de despeje entre buses sucesivos.	[s]
t_d	: Tiempo de permanencia promedio.	[s]
Z_a	: Probabilidad de que se produzcan colas en el paradero.	-
c_v	: Coeficiente de variación de los tiempos de permanencia.	-
B_s	: Número máximo de buses por hora en un paradero.	[bus/h].
N_{eb}	: Número efectivo de sitios de detención.	-
n	: Número promedio de buses que pueden entrar al paradero cuando la entrada esta libre.	-
S	: Es el flujo de saturación en la línea de acceso al paradero.	[bus/s]
t_b	: Es la duración promedio de un periodo en el cual la entrada al paradero está bloqueada.	[s]
t_p	: Tiempo por transferencia de pasajeros	[s]
β_0	: Tiempo por detención en la transferencia de pasajeros (cierre y apertura de puertas).	[s].
β_1	: Tiempo de subida por pasajero.	[s/pas]
p_{si}	: Número de pasajeros subiendo por la puerta i.	[pas]

β_1	: Tiempo de bajada por pasajero.	[s/pas]
p_{si}	: Número de pasajeros bajando por la puerta i.	[pas]
SD_k	: Desviación estándar de los tiempos de llegada de la entidad k (buses o pasajeros).	-
N_k	: número de buses o pasajeros según sea la identidad k, presentes en la simulación.	-
h_k	: Tiempo entre llegada de la entidad k.	[s]
\bar{h}	: Valor medio de la entidad k.	[s]
q	: Flujo medio de parada de buses durante el período de simulación.	[bus/h]
B	: Flujo medio de subida de pasajeros durante el período de simulación.	[pas/h]
t_{pi}	: Tiempo por servicio de pasajeros del bus i.	[s]
β_0	: Tiempo muerto promedio por detención.	[s]
β_{bj}	: Tiempo marginal de abordaje del pasajero j.	[s]
P_{bi}	: Número de pasajeros que suben al bus i.	-
β_{ai}	: Tiempo marginal de bajada de pasajeros del bus i.	[s/pas]
p_{ai}	: Número de pasajeros que bajan del bus i.	-
Q_b	: Capacidad del paradero.	[bus/h]
N_b	: Número de buses simulados.	-
t_c	: Tiempo de despeje entre buses sucesivos.	[s]
t_{pi}	: Tiempo por servicio de pasajeros del bus i.	[s]
t_{ei}	: Tiempo asociado a demoras extra del bus i.	[s]
x_b	: Grado de saturación de la parada de buses.	-
q	: flujo de buses del paradero durante la simulación.	[bus/h]
Q_b	: Capacidad del paradero [bus/h].	-
L_q	: Media de buses en cola en el paradero.	[bus]
L_{qi}	: Número de buses en cola encontrados por el bus i.	[bus]

d_{qi}	: Tiempo en cola experimentado por el bus i.	[s]
D_k	: Tiempo medio de espera por bus por causa k.	[s/bus]
d_{ik}	: Tiempo de demora del bus i por causa k.	[s]
AWT	: Tiempo promedio de espera por pasajero en el andén.	[s/pas]
w_j	: Tiempo de espera del pasajero j.	[s].
N_p	: Cantidad de pasajeros presentes en la simulación.	-
k_{pi}	: Cantidad de pasajeros en el andén cuando llega el bus i.	[pas].
K_p	: Promedio de número de pasajeros en el andén.	[pas]
k_{pi}	: Número de pasajeros en el andén a la llegada del bus i.	
t_p	: Tiempo que un bus permanece detenido por transferencia de pasajeros, PASSION 5.0.	[s]
β_0	: Tiempo muerto promedio por detención.	[s]
δ_1	: Variable binaria que toma valor 1 si es que hay más de 10 pasajeros en el andén y 0 en cualquier otro caso.	-
δ_2	: Variable binaria que toma valor 1 si es que hay más de 4 pasajeros en el andén y 0 en cualquier otro caso.	-
δ_3	: Variable binaria que toma valor 1 si es que la capacidad del bus es inferior al 30% y 0 en cualquier otro caso.	-
p_{sj}	: Número de pasajeros que bajan por la puerta j.	-
p_{bj}	: Número de pasajeros que suben por la puerta j.	-
N_s	: Número de sitios de detención.	-
t_{sem}	: Cantidad de tiempo extra asociado al bus por demoras en el semáforo.	[s]
t_{rojo}	: Tiempo de la simulación en el cual comienza la asignación de rojo asociado al número del ciclo, según el tiempo de salida asociado.	[s]
t_{ciclo}	: Ciclo del semáforo.	[s]
r_{verde}	: Razón porcentual de verde del ciclo del semáforo.	-
t_{salida}	: Tiempo en el cual la unica posible limitante del bus para continuar es la condición del semáforo.	[s]
t_{ds}	: Cantidad de tiempo por desplazamiento.	[s]

d_k	: Distancia a recorrer.	[m]
v	: Velocidad que desarrolla el bus en los arcos.	[m/s]
d_1	: Distancia a recorrer hasta el paradero dos los buses que no paran en el paradero uno.	[m]
d_p	: Distancia entre paraderos.	[m]
d_1	: Distancia a recorrer hasta el paradero dos los buses que se detienen en el primer paradero.	[m]
x_e	: Variable aleatoria con distribución exponencial.	-
β	: Corresponde a $1/q$, donde q es el flujo de buses [bus/s].	[s/bus]
u	: Número aleatorio entre 0 y 1.	-
x_c	: Variable aleatoria con distribución Cowan M3.	-
Δ	: Intervalo mínimo entre llegadas $1/Q$, donde Q es la capacidad del bus [bus/s].	[s/bus]
β	: Corresponde a $1/q$, donde q es el flujo de buses [bus/s].	[s/bus]
θ	: Proporción de buses que llegan en pelotón.	-

Bibliografía

- Aguirre, F. (2014). *Aplicaciones para el diseño de prioridades al transporte público basadas en planillas de cálculo*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de los Andes, Santiago.
- Charad, D. (2007). *Modelación microscópica y experimentación de estaciones de transferencia mediante microsimulación*. Memoria de Título, Facultad de Ingeniería y ciencias aplicadas, Universidad de los Andes.
- Fernández, R. (2001). *Modelling Bus Stop Interactions*. PhD thesis, University of London.
- Fernández, R., & Moreno, C. (2005). *Passion 5 Versión mejorada de un microsimulador de operaciones en paraderos de transporte Público*. Actas de XII Congreso chileno de Ingeniería de Transporte.
- Gibson, J., Baeza, I., & Willumsen, L. (1989). *Bus stops, congestion and congested bus stop*. Traffic Engineering and control, 30, 291-296.
- Gibson, J., Fernández, R., & Albert, A. (1997). *Operación en paraderos formales en santiago*. Actas del VID Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, 397-408.
- HCM. (2000). *Highway capacity manual*. Washington, D.C: Transportation Research Board.
- Holroyd, E., & Scraggs, D. (1966). *Waiting times for buses in Central London*. Traffic Engineering and Control 8(3), 158-160.
- Kumararaja, P., & Karuppanan, G. (2016). *Planning of Bus Stops for Safe and Efficient Passenger Boarding and Alighting*. International Journal of Engineering and Technical Research. V5.
- Lobo, A. (1997). *Automatic Vehicule Location Technology: Application for Buses*. Phd thesis, Centre for transport Studies, University College London.
- Montero, A. (2020). *Modelo microscópico de simulaciones múltiples entre paraderos de buses en eje vial*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico, Universidad de los Andes, santiago.

SECTRA. (2014). *Actualización Plan de Transporte Temuco y desarrollo de anteproyecto, I Etapa.*

Transmodeler. (2021). *TransModeler Overview.* Obtenido de <https://www.caliper.com/transmodeler/default.htm>

VISSIM. (2021). *Descripción general de VISSIM.* Obtenido de <https://www.ptvgroup.com/es/soluciones/productos/ptv-vissim-nuevo/>

ANEXOS

ANEXOS

A. Anexos digitales

A.1 Base de datos.

El siguiente link lleva hacia la base de datos de la investigación “INI4-02 Herramienta de modelación de la circulación de transporte público”:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1PTTqQiGT2gZwomCsl2o7G4uxq8IMqBGxkK3w4neISyM/edit#gid=2078802113>

A.2 Link descarga PASSION K y video de inicio rápido.

https://drive.google.com/drive/folders/1k27jAKPeIWAwFlifvI9G_SDTEYaBufTW?usp=sharing

B. Anexos de módulos del primer set de datos

B.1 Módulo de buses paradero uno, set uno.

Tabla B.1. Módulo de buses del paradero uno, usado en la validación el primer set de datos.

Identificación ruta	Tiempo de llegada del bus	Pasajeros que bajan del bus	Tiempo medio de bajada a pass	Capacidad del bus	Tiempo de bloqueo del sitio	Cantidad de puertas	Pasajeros que bajan del bus P2	Tiempo medio de bajada a pass	Tiempo de bloqueo del sitio P2
661	67	0	0	35	0	2	1	2	0
32	110	0	0	35	0	2	0	0	0
22	129	0	0	35	0	2	0	0	0
53	156	1	2	35	0	2	0	0	0
72	160	0	0	35	0	2	2	2	0
71	198	0	0	35	0	2	0	0	0
72	242	0	0	35	0	2	1	2	0
81	383	1	1	35	0	2	0	0	0
13	459	0	0	35	0	2	0	0	0
41	485	0	0	35	0	2	0	0	0
83	490	1	2	35	0	2	0	0	0
94	555	0	0	35	0	2	0	0	0
72	616	0	0	35	0	2	2	2	0
52	646	1	2	35	0	2	1	2	0
51	650	2	2	35	0	2	2	2	0
71	712	0	0	35	0	2	0	0	0
82	725	0	0	35	0	2	0	0	0
11	773	0	0	35	0	2	0	0	0
81	811	0	0	35	0	2	0	0	0
13	832	0	0	35	0	2	0	0	0
32	882	0	0	35	0	2	0	0	0
53	907	1	2	35	0	2	1	2	0
72	945	0	0	35	0	2	1	2	0
94	1005	0	0	35	0	2	0	0	0
84	1071	0	0	35	0	2	0	0	0
53	1087	0	0	35	0	2	0	0	0
91	1115	0	0	35	0	2	2	2	0
11	1124	0	0	35	0	2	0	0	0
72	1191	2	2	35	0	2	0	0	0
32	1230	0	0	35	0	2	1	2	0

Identificación ruta	Tiempo de llegada del bus	Pasajeros que bajan del bus	Tiempo medio de bajada a pass	Capacidad del bus	Tiempo de bloqueo del sitio	Cantidad de puertas	Pasajeros que bajan del bus P2	Tiempo medio de bajada a pass	Tiempo de bloqueo del sitio P2
84	1247	0	0	35	0	2	0	0	0
13	1262	2	1	35	0	2	1	2	0
94	1332	0	0	35	0	2	0	0	0
81	1369	3	2	35	0	2	0	0	0
51	1479	0	0	35	0	2	0	0	0
91	1561	0	0	35	0	2	0	0	0
71	1600	0	0	35	0	2	1	2	0
12	1651	1	2	35	0	2	2	2	0
103	1667	0	0	35	0	2	0	0	0
22	1698	0	0	35	0	2	0	0	0
52	1732	0	0	35	0	2	1	2	0
42	1738	0	0	35	0	2	0	0	0
41	1761	0	0	35	0	2	1	2	0
51	1767	0	0	35	0	2	0	0	0

B.2 Módulo de pasajeros paradero uno, set uno.

Tabla B.2. Módulo de pasajeros del paradero uno, usado en la validación el primer set de datos.

Ruta Pasajero	Tiempo de Llegada	Tiempo medio en subir
72	235	2
11	545	2
11	754	2
81	990	2

B.3 Módulo de pasajeros paradero dos, set uno.

Tabla B.3. Módulo de pasajeros del paradero dos, usado en la validación el primer set de datos.

Ruta Pasajero	Tiempo de Llegada	Tiempo medio en subir
23	106	2

C. Anexos de módulos del segundo set de datos

C.1 Módulo de buses paradero uno, set dos.

Tabla C.1. Módulo de buses del paradero uno, usado en la validación del segundo set de datos.

Identificación ruta	Tiempo de llegada del bus	Pasajeros que bajan del bus	Tiempo medio de bajada a pass	Capacidad del bus	Tiempo de bloqueo del sitio	Cantidad de puertas	Pasajeros que bajan del bus P2	Tiempo medio de bajada a pass	Tiempo de bloqueo del sitio P2
94	26	0	0	36	0	2	0	0	0
72	59	0	0	36	0	2	0	0	0
52	81	2	2	36	0	2	1	2	0
81	96	0	0	36	0	2	0	0	0
71	144	1	3	36	0	2	0	0	0
12	149	0	0	36	0	2	0	0	0
53	180	0	0	36	0	2	0	0	0
72	242	0	0	36	0	2	0	0	0
71	255	0	0	36	0	2	2	2	0
82	261	0	0	36	0	2	1	2	0
34	316	2	2	36	0	2	0	0	0
41	350	0	0	36	0	2	0	0	0
94	417	0	0	36	0	2	0	0	0
11	427	0	0	36	0	2	0	0	0
22	436	2	2	36	0	2	1	2	0
103	452	0	0	36	0	2	0	0	0
53	462	0	0	36	0	2	0	0	0
32	510	0	0	36	0	2	0	0	0
91	517	0	0	36	0	2	0	0	0
51	554	0	0	36	0	2	1	2	0
661	686	0	0	36	0	2	0	0	0
12	727	0	0	36	0	2	0	0	0
82	821	0	0	36	0	2	0	0	0
52	828	0	0	36	0	2	0	0	0
22	865	1	2	36	0	2	1	2	0
84	950	1	2	36	0	2	0	0	0
53	959	1	2	36	0	2	0	0	0
91	987	0	0	36	0	2	0	0	0
72	1054	0	0	36	0	2	0	0	0
71	1067	0	0	36	0	2	0	0	0

Identificación ruta	Tiempo de llegada del bus	Pasajeros que bajan del bus	Tiempo medio de bajada a pass	Capacidad del bus	Tiempo de bloqueo del sitio	Cantidad de puertas	Pasajeros que bajan del bus P2	Tiempo medio de bajada a pass	Tiempo de bloqueo del sitio P2
81	1073	0	0	36	0	2	0	0	0
101	1111	1	3	36	0	2	0	0	0
82	1142	0	0	36	0	2	0	0	0
83	1151	1	2	36	0	2	1	2	0
72	1159	0	0	36	0	2	0	0	0
51	1232	0	0	36	0	2	2	2	0
94	1271	1	2	36	0	2	0	0	0
41	1346	0	0	36	0	2	2	2	0
71	1364	0	0	36	0	2	0	0	0
12	1430	0	0	36	0	2	0	0	0
91	1473	0	0	36	0	2	0	0	0
94	1479	0	0	36	0	2	0	0	0
11	1562	0	0	36	0	2	0	0	0
32	1576	0	0	36	0	2	0	0	0
53	1595	0	0	36	0	2	2	2	0
81	1615	0	0	36	0	2	0	0	0
13	1688	0	0	36	0	2	0	0	0
82	1694	0	0	36	0	2	0	0	0
52	1700	0	0	36	0	2	0	0	0
661	1732	1	2	36	0	2	0	0	0

C.2 Módulo de pasajeros paradero uno, set dos.

Tabla C.2. Módulo de pasajeros del paradero uno, usado en la validación del segundo set de datos.

Ruta Pasajero	Tiempo de Llegada	Tiempo medio en subir
72	187	2

C.3 Módulo de pasajeros paradero dos, set dos.

Tabla C.3. Módulo de pasajeros del paradero dos, usado en la validación del segundo set de datos.

Ruta Pasajero	Tiempo de Llegada	Tiempo medio en subir
94	1	2
94	1	2
94	1	2
94	428	2
661	625	2
53	981	2
53	981	2

D. Anexos de módulos del tercer set de datos

D.1 Módulo de buses paradero uno, set tres.

Tabla D.1. Módulo de buses del paradero uno, usado en la validación del tercer set de datos.

Identificación ruta	Tiempo de llegada del bus	Pasajeros que bajan del bus	Tiempo medio de bajada a pass	Capacidad del bus	Tiempo de bloqueo del sitio	Cantidad de puertas	Pasajeros que bajan del bus P2	Tiempo de bloqueo del sitio P2	Tiempo de bloqueo del sitio P2
11	66	2	2	35	0	2	0	0	0
82	96	0	0	35	0	2	0	0	0
13	116	0	0	35	0	2	0	0	0
4	166	0	0	35	0	2	0	0	0
81	333	0	0	35	0	2	1	2	0
51	344	0	0	35	0	2	0	0	0
63	344	0	0	35	0	2	0	0	0
22	352	0	0	35	0	2	0	0	0
72	359	0	0	35	0	2	3	2	0
102	361	0	0	35	0	2	0	0	0
53	373	1	2	35	0	2	0	0	0
52	440	0	0	35	0	2	0	0	0
72	450	0	0	35	0	2	0	0	0
12	453	0	0	35	0	2	0	0	0
94	497	0	0	35	0	2	0	0	0
32	498	0	0	35	0	2	0	0	0
82	554	0	0	35	0	2	0	0	0
71	573	0	0	35	0	2	0	0	0
103	676	0	0	35	0	2	3	3	0
11	716	0	0	35	0	2	0	0	0
83	733	0	0	35	0	2	1	2	0
84	784	0	0	35	0	2	2	2	0
13	790	0	0	35	0	2	0	0	0
51	806	0	0	35	0	2	0	0	0
22	818	0	0	35	0	2	1	2	0
91	843	0	0	35	0	2	0	0	0
81	891	0	0	35	0	2	0	0	0
72	895	0	0	35	0	2	1	2	0
53	935	0	0	35	0	2	0	0	0
32	949	0	0	35	0	2	0	0	0

Identificación ruta	Tiempo de llegada del bus	Pasajeros que bajan del bus	Tiempo medio de bajada a pass	Capacidad del bus	Tiempo de bloqueo del sitio	Cantidad de puertas	Pasajeros que bajan del bus P2	Tiempo de bloqueo del sitio P2	Tiempo de bloqueo del sitio P2
42	1021	0	0	35	0	2	0	0	0
71	1027	0	0	35	0	2	0	0	0
101	1113	0	0	35	0	2	0	0	0
82	1126	0	0	35	0	2	0	0	0
102	1235	0	0	35	0	2	3	2	0
94	1268	2	2.5	35	0	2	0	0	0
31	1279	0	0	35	0	2	0	0	0
61	1331	0	0	35	0	2	0	0	0
103	1361	0	0	35	0	2	0	0	0
13	1365	0	0	35	0	2	0	0	0
74	1386	0	0	35	0	2	0	0	0
52	1413	0	0	35	0	2	0	0	0
51	1459	0	0	35	0	2	1	3	0
81	1461	1	2	35	0	2	0	0	0
102	1791	0	0	35	0	2	0	0	0

D.2 Módulo de pasajeros paradero uno, set tres.

Tabla D.2. Módulo de pasajeros del paradero uno, usado en la validación del tercer set de datos.

Ruta Pasajero	Tiempo de Llegada	Tiempo medio en subir
51	1036	2
51	1036	2
102	1078	2
94	1181	4
102	1739	2

D.3 Módulo de pasajeros paradero dos, set tres.

Tabla D.3. Módulo de pasajeros del paradero dos, usado en la validación del tercer set de datos.

Ruta Pasajero	Tiempo de Llegada	Tiempo medio en subir
61	407	2
13	1111	3
13	1111	3

E. Anexos de módulos del cuarto set de datos

E.1 Módulo de buses paradero uno, set cuatro.

Tabla E.1. Módulo de buses del paradero uno, usado en la validación del cuarto set de datos.

Identificación ruta	Tiempo de llegada del bus	Pasajeros que bajan del bus	Tiempo medio de bajada pass	Capacidad del bus	Tiempo de bloqueo del sitio	Cantidad de puertas	Pasajeros que bajan del bus P2	Tiempo medio de bajada pass	Tiempo de bloqueo del sitio P2
12	123	0	0	37	0	2	1	2	0
11	127	0	0	37	0	2	0	0	0
94	224	0	0	37	0	2	0	0	0
13	370	0	0	37	0	2	1	2	0
91	444	0	0	37	0	2	0	0	0
12	638	0	0	37	0	2	0	0	0
103	749	0	0	37	0	2	0	0	0
72	762	1	2	37	0	2	0	0	0
13	853	0	0	37	0	2	0	0	0
94	960	0	0	37	0	2	0	0	0
103	1175	0	0	37	0	2	0	0	0
12	1278	0	0	37	0	2	0	0	0
13	1596	0	0	37	0	2	0	0	0
12	1802	0	0	37	0	2	0	0	0

E.2 Módulo de pasajeros paradero uno, set cuatro.

Tabla E.2. Módulo de pasajeros del paradero uno, usado en la validación del cuarto set de datos.

Ruta Pasajero	Tiempo de Llegada	Tiempo medio en subir
94	213	2
13	614	2
13	823	3

E.3 Módulo de pasajeros paradero dos, set cuatro.

Tabla E.3. Módulo de pasajeros del paradero dos, usado en la validación del cuarto set de datos.

Ruta Pasajero	Tiempo de Llegada	Tiempo medio en subir
13	313	2
12	500	2
12	500	2
103	703	2