

PASSION 5.0: VERSIÓN MEJORADA DE UN MICROSIMULADOR DE OPERACIONES EN PARADEROS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Rodrigo Fernández y Carlos Moreno

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

Casilla 228-3, Santiago, Fono/Fax 56-2-6894206

rodferna@ing.uchile.cl

RESUMEN

Este artículo describe las características de la nueva versión 5.0 del modelo PASSION de microsimulación de las interacciones entre buses, pasajeros y tráfico en paraderos. La versión anterior del modelo (v.4.2) fue lanzada el año 2000 en el Reino Unido. El artículo contiene una descripción del proceso de modelación del problema y de sus diferencias con herramientas equivalentes. Se muestra la nueva y más amigable interfaz humano-computador del programa, comparándola con la versión anterior. También se detallan las funciones incorporadas a la nueva versión del modelo y se muestra su validación que asegura la apropiada representación de las interacciones en paraderos de sitios múltiples. Para ello se hace uso del modelo IRENE 4.2, de amplia difusión en el medio nacional. Luego se presentan resultados de corridas de producción para distintos casos de demanda de pasajeros y parámetros del modelo. La principal conclusión del trabajo es que se cuenta con una herramienta más flexible para representar operaciones en paraderos de hasta dos sitios. Esta herramienta permite realizar experimentos y analizar resultados para mejorar el diseño físico y operacional del transporte público de superficie.

1. INTRODUCCIÓN

La modelación de operaciones de transporte público en paraderos ha sido abordada desde dos perspectivas. Por una parte, modelos analíticos para estimar la capacidad de paraderos, como la fórmula de COMONOR (EBTU, 1982) y las fórmulas del Highway Capacity Manual (TRB, 2000). Por otra, con modelos de simulación microscópica, como IRENE 4.2 (Gibson et al, 1989) y PASSION 4.2 (Fernández, 2001a). Tanto IRENE como PASSION son los únicos modelos de simulación reportados en la literatura especializada orientados a este objetivo. Una revisión tanto de los modelos analíticos como de los de simulación de paraderos es aportada por Fernández y Planzer (2002).

El modelo PASSION, codificado en lenguaje C++, permite modelar las interacciones que se producen entre pasajeros, buses y tráfico en paraderos de un sitio (Fernández, 2001a). Fue desarrollado con el objeto de hacer experimentos de simulación para estudiar tales interacciones (Fernández, 2001b). Debido a su carácter de apoyo a una investigación más amplia, es árido para el usuario y algunos de sus modelos internos pueden ser perfeccionados. Corregir el modelo en estos y otros aspectos es lo que motivó este trabajo.

En este contexto, el objetivo del trabajo reportado en este artículo fue el de perfeccionar las limitaciones de forma y fondo que presentaba el modelo PASSION 4.2. Para ello se plantearon como objetivos específicos los siguientes (Moreno, 2004): mejorar la interfaz con el usuario; actualizar el modelo de tiempo detenido de buses en el paradero; utilizar funciones específicas para generar las llegadas de pasajeros y buses al paradero; y buscar estrategias para representar paraderos de más de un sitio.

En lo que sigue, se hace una breve descripción de la filosofía tras el modelo PASSION. Posteriormente, se detallan las nuevas funciones incorporadas en su versión 5.0. Luego se muestra la validación de esta nueva versión del modelo, contrastando sus resultados con los del programa IRENE 4.2. Finalmente, se hacen comentarios sobre el trabajo desarrollado.

2. EL MODELO PASSION

El modelo **PASSION** (PArallel Stop SimulatION) fue desarrollado como un laboratorio virtual para estudiar en detalle los efectos de las interacciones en paraderos de buses de un sitio. La expresión “parallel” en su nombre no se refiere a ninguna arquitectura computacional en particular, sino que a la naturaleza concurrente de las interacciones que modela. Su objetivo fue estudiar estas interacciones más allá de lo que puede ser posible con el modelo IRENE, incorporando distintos patrones de llegadas de buses y pasajeros y diversas formas de salida de los buses desde un paradero. Por esta razón, se restringió su alcance a paraderos de un sitio, correspondientes a sistemas de transporte público organizados. IRENE, por su parte, fue desarrollado “para modelar las complejas interacciones que influyen en la capacidad y demoras en paraderos congestionados” (Gibson et al, 1989: 294); es decir, representativas de sistemas de transporte público del tercer mundo.

La Figura 1 muestra las principales componentes del modelo PASSION (ver Fernández, 2001b para más detalles). Como puede observarse, el modelo se compone de las cuatro partes encerradas en la línea punteada de la figura.

El módulo de generación de los buses produce las características de los vehículos tales como su línea, su instante de llegada al paradero, la cantidad de pasajeros que bajarán, el tiempo marginal de bajada de cada uno, y la capacidad disponible del bus. El módulo de generación de pasajeros entrega las características de los usuarios como la línea que espera, el instante en que llegó al paradero, y el tiempo marginal de subida de cada pasajero. Ambas listas de datos se generan al inicio de la simulación mediante un uso preestablecido de planillas de cálculo. Luego, el modelo de interacción toma los datos de los módulos anteriores y los combina, considerando las condiciones de diseño y operación del paradero (v.g., salida por brechas por pista adyacente), además de la forma de operar los buses (v.g., uso de puertas). El módulo de rendimiento recoge y resume los resultados de la interacción entre pasajeros, buses y tráfico. Tanto el diseño del paradero como la forma de operar de los buses pueden cambiarse para evaluar distintos escenarios; por ejemplo, el impacto sobre las demoras de un paradero en bahía versus un paradero con un andén adelantado hacia la calzada o “bus boarder” (TfL, 2000).

La Figura 2 muestra un ejemplo de una salida resumida del programa PASSION 4.2. Es fácil notar la aridez de la interfaz con el usuario de esta versión experimental.

3. NUEVAS FUNCIONES EN PASSION 5.0

A continuación se resumen las nuevas capacidades del modelo PASSION. Para mayores detalles, el lector puede remitirse a Moreno (2004).

3.1. Mejoramiento de la interfaz con el usuario

El primer objetivo en el mejoramiento del modelo PASSION fue cambiar la forma en que éste interactuaba con el usuario. Se utilizó la plataforma Visual C++ para generar la versión 5.0 del programa sobre plataforma Windows. PASSION 5.0 despliega menús interactivos divididos en cuatro fichas (ver Figura 3): datos del paradero, demanda del paradero, condiciones de salida y simulación animada. Estas fichas abren en total 13 módulos interactivos para el manejo de la simulación y dos pantallas de resultados. Una de las pantallas de resultados es una simulación animada que muestra las interacciones entre buses y pasajeros más rápido que en tiempo real (Figura 4). La otra, es una salida gráfica que muestra resultados de corridas múltiples y análisis de sensibilidad (Figura 5). De todas formas, se mantiene la salida clásica de PASSION que se graba en un archivo plano de resultados, similar al de la Figura 2, pero ahora en castellano.

3.2. Actualización del modelo de tiempo detenido

PASSION 4.2 calcula el tiempo detenido por transferencias de pasajeros como (Fernández y Planzer, 2002):

$$t_p = \begin{cases} \beta_0 + \sum_{k=1}^{p_s} \beta_{sk} + \beta_b p_b & \text{subida / bajada secuencial} \\ \beta_0 + \max \left\{ \sum_{k=1}^{p_s} \beta_{sk}; \beta_b p_b \right\} & \text{subida / bajada simultánea} \end{cases} \quad (1)$$

Donde:

- t_p = tiempo que un bus permanece detenido por transferencia de pasajeros [s]
 β_0 = tiempo muerto por detención [s]
 β_{sk} = tiempo de subida del pasajero k [s]
 β_b = tiempo marginal de bajada para el bus [s/pax]
 p_s = número de pasajeros que sube al bus [pax]
 p_b = número de pasajeros que baja del bus [pax]

Sin embargo, Gibson et al (1997) llegó a un modelo más completo del tiempo detenido en paraderos formales con alta demanda de pasajeros:

$$t_p = \beta_0 + \beta'_0 \delta_1 + \\ + \max_{j=\text{puerta}} \left\{ \beta_1 + \beta'_1 \delta_1 + \beta''_1 \delta_2 \right\} p_{sj} + \left\{ \beta_2 \exp(-\beta'_2 p_{bj}) + \beta''_2 \delta_3 \right\} p_{bj} \quad (2)$$

Donde p_{ij} es el número de pasajeros que sube ($i = s$) y baja ($i = b$) por la puerta j . Los $\{\beta_i\}$ y $\{\delta_k\}$ son vectores de parámetros y variables mudas, respectivamente. Los parámetros $\{\beta_i\}$ tienen el mismo significado que en el modelo anterior. Las variables mudas en tanto son $\delta_1 = 1$, si el andén está congestionado; $\delta_2 = 1$, si suben más de 4 pasajeros por bus; y $\delta_3 = 1$, si el pasillo del bus está lleno. En caso contrario, $\delta_k = 0$, con $k = 1, 2, 3$.

Esta especificación del modelo de tiempo detenido es más rica y flexible, por lo que fue incorporada en la nueva versión 5.0 del modelo PASSION.

3.3. Generación de funciones de llegadas de pasajeros y buses

Como se mencionó en el Capítulo 2, la versión 4.2 de PASSION hace uso de planillas de cálculo para generar las características de los buses y pasajeros a ser simulados. Si bien esto permite absoluta flexibilidad en la forma de distribuir estas características con fines de investigación, para efectos de diseño resulta más conveniente que puedan ser generadas con distribuciones preestablecidas. De esta forma, se predefinieron cuatro distribuciones para generar la llegada de buses y pasajeros al paradero: llegadas uniformes, llegadas aleatorias según un proceso de Poisson, llegadas aleatorias según una distribución M3 de Cowan (1975), además de una distribución de intervalos entre buses o pasajeros cualquiera que puede ser definida por el usuario (ver Figura 6).

3.4. Representación de paraderos de sitios múltiples

El mayor adelanto metodológico de la versión 5.0 de PASSION es la capacidad de simular paraderos de hasta dos sitios. Según la experiencia internacional, este es el número óptimo de sitios desde el punto de vista de la eficiencia de un paradero de sitios múltiples linealmente dispuestos (TRB, 2000). Los mayores cambios que genera la introducción de sitios múltiples se refiere a la forma de estimar la capacidad del paradero y al proceso de ocupación del paradero.

La estimación de la capacidad se calcula en PASSION como el inverso del promedio de la suma de los tiempos que los buses, atendidos durante el período de simulación, permanecen en el paradero. Esto se puede resumir como:

$$Q_b = \frac{3600}{\frac{1}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} (t_c + t_{pi} + t_{ei})} \quad (3)$$

Donde:

Q_b : capacidad del paradero [bus/h]

N_b : cantidad de buses simulados

t_c : tiempo perdido por aceleración, frenado y recorrido del sitio [s]

t_{pi} : tiempo de transferencia de pasajeros del bus i [s]

t_{ei} : tiempo de espera interna del bus i por bloqueo de la salida [s]

Para un paradero de múltiples sitios se aplica el mismo principio anterior, pero enfocado al último sitio de parada. El último sitio de parada puede presentar 3 estados diferentes (Figura 7): bus en tránsito, caso en el cual el bus recorre el sitio sin parar en él; bus transfiriendo pasajeros, caso en que la espera interna puede o no ser nula; y bus en espera interna, situación en la cual el bus puede o no haber transferido pasajeros.

Para el proceso de ocupación, el cálculo de los tiempos que los buses emplean en transitar por el paradero se hizo con un modelo de movimiento uniformemente acelerado, ocupándose una tasa única equivalente a la media entre la tasa de aceleración y frenado del bus. Por lo tanto, la velocidad de entrada de los buses al paradero quedará determinada por esta tasa media, el sitio de parada que estos encuentren disponible y el largo de los sitios (Moreno, 2004).

4. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE PASSION 5.0

La validación de los resultados entregados por PASSION 5.0 al modelar paraderos de sitios múltiples se hace contrastándolos con los producidos por el modelo IRENE. Este último ha sido validado en situaciones reales (Atenas, 1998) y es aceptado en el ámbito de la ingeniería nacional. Por su parte, la validación de PASSION como simulador de las interacciones en paraderos de un sitio fue hecha por Fernández (2001a).

La validación de PASSION 5.0 consistió en contrastar un conjunto de corridas contra IRENE 4.2, considerando un paradero formal de dos sitios bajo distintos niveles de demanda de pasajeros, los cuales llegan a tasa constante al paradero. Se tomaron niveles de demanda de buses que permitieron tener saturación para que IRENE pueda calcular la capacidad del paradero. Es esta capacidad la que se usa como índice de validación. Para que ambos modelos replicaran la misma situación fue necesario ajustar sus parámetros, proceso que por razones de espacio no se detalla en este artículo; sin embargo, se encuentra reportado en Moreno (2004).

Los resultados de la comparación entre los valores de capacidad entregados por ambos modelos se muestran en la Tabla 1. De la Tabla puede observarse que la diferencia promedio en la estimación de capacidades de un 1,6%, lo que para todo efecto práctico es irrelevante.

Tabla 1: Comparación de capacidad en paradero de dos sitios (Moreno, 2004)

Tasa de subida [pax/bus]	Capacidad del paradero ⁽¹⁾ [bus/h]		Diferencia c/r IRENE [%]
	IRENE 4.2	PASSION 5.0	
2	298	292	-2,01
3	241	241	0,00
4	204	204	0,00
5	177	177	0,00
6	158	156	-1,27
7	143	139	-2,80
8	128	126	-1,56
9	120	116	-3,33
10	110	106	-3,64
Diferencia promedio			-1,62

(1): velocidad de recorrido de los buses: 20 km/h; longitud de los buses: 15 m; tasa media de aceleración y frenado: 1,2 m/s²; tiempo de reacción conductores: 1,2 s.

Asumiendo que el número de pasajeros que sube y baja de un bus es el mismo, se hicieron corridas de producción con PASSION 5.0 para obtener la capacidad de un paradero de dos sitios – de 15 metros de largo cada uno – para distintos niveles de demanda y parámetros de cinemática. Los resultados se muestran en la Tabla 2. La Figura 8 muestra los mismos resultados en todo el rango y para valores intermedios de tasa de subida. Se observa que la capacidad se hace menos sensible a los parámetros a medida que la demanda por bus aumenta. Así por ejemplo, para tasas de subida de 5 pasajeros por bus, la diferencia entre el menor valor de capacidad predicho con respecto al mayor es de un 12%. Se corrobora, además, lo encontrado por Gibson y Fernández (1995) usando el modelo IRENE: los valores de capacidad práctica (para $x_p = 0,6$) de paraderos de dos sitios fluctúan entre los 60 y no más de 160 buses por hora, dependiendo de la demanda de subida.

Tabla 2: Estimación de la capacidad de un paradero con PASSION 5.0 (Moreno, 2004)

Tas. de sub da [pax/bus]	Capacidad del paradero [bus/h]				
	$a = 1,5$ $t_r = 2,5$	$a = 1,75$ $t_r = 3,0$	$a = 1,75$ $t_r = 2,5$	$a = 1,0$ $t_r = 2,5$	$a = 1,9$ $t_r = 1,8$
2	215	226	237	252	265
3	190	198	207	219	228
4	171	177	184	193	201
5	153	159	164	171	177
6	141	144	149	154	161
7	130	133	137	142	146
8	120	122	126	130	133
9	110	115	117	121	123
10	104	106	108	112	115

a: tasa media de aceleración y frenado de buses [m/s²]; t_r: tiempo de reacción de los conductores de buses [s].

En IRENE la capacidad depende, además del tiempo de transferencia de pasajeros (t_p), de la longitud de los vehículos, de su velocidad de recorrido, de sus tasas de aceleración y frenado y del flujo de saturación de la pista del paradero (Gibson et al, 1989). IRENE asume que cada vez

que un bus se mueve al interior del paradero lo hará a velocidad de recorrido. En contraste, la velocidad a la cual un bus se desplaza dentro del paradero en PASSION 5.0 dependerá de la longitud que debe recorrer, de las tasas de aceleración y frenado (a) y del tiempo de reacción del conductor (t_r). Por esta razón, la capacidad se muestra dependiente de estos dos últimos parámetros en la Tabla 2 y Figura 8. Esto permitiría modelar el efecto de distintos tipos de buses llegando al paradero.

5. COMENTARIOS

Los resultados del trabajo expuesto se pueden resumir en los siguientes. En primer lugar, se cuenta con una nueva versión del programa, PASSION 5.0, la que permite una fluida comunicación con el usuario. Segundo, se mejoraron algunos modelos internos claves del software, generándose un programa más avanzado que el original. Tercero, se incorporaron facilidades para la generación de datos de entrada y para la interpretación de resultados; en particular, una simulación animada de buses y pasajeros. Cuarto, se logró implementar la modelación de paraderos de sitios múltiples, lo cual deja a PASSION a similar nivel de aplicación que su modelo competitivo IRENE. Finalmente, PASSION 5.0, se encuentra validado con respecto a IRENE 4.2, para las mismas condiciones de operación de paraderos.

Experimentos realizados con PASSION 5.0 confirman lo predicho por Fernández (2001b), respecto de la importancia de considerar en el diseño de paraderos los efectos de la variación de los intervalos de llegada de buses y pasajeros al área de parada. Moreno (2004) demostró que la fluctuación de los intervalos de llegada de buses son los que más hacen variar la capacidad de atención del paradero (hasta un 25%). Fluctuaciones en los intervalos de llegada de pasajeros producen menores variaciones en la capacidad de atención de buses (hasta un 15%). Estas variaciones pueden resultar críticas al momento de diseñar un paradero con alto flujo de buses y demanda de pasajeros. Este fenómeno no había sido reportado con anterioridad en paraderos de sitios múltiples.

Con el nuevo modelo PASSION 5.0 se puede ahora extender la investigación de las operaciones en paraderos de hasta dos sitios. Algunas líneas que se pueden explorar son:

- Influencia de la combinación de frecuencias de distintas líneas.
- Efecto de demandas muy disímiles entre líneas.
- Consecuencia de mezclar diferentes tipos de buses en un mismo paradero (articulados, convencionales, con distinto número de puertas, con distinta longitud).
- Impacto de la llegada de pasajeros en grupos.

En resumen, con este trabajo se pone a disposición del analista – necesariamente ilustrado en el tema – una nueva herramienta para mejorar las operaciones y diseño físico del transporte público de superficie.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados reportados no habrían sido posibles sin el abnegado trabajo de Carlos Moreno en su Memoria de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile. Valiosos comentarios fueron aportados por Marcela Munizaga y Jaime Gibson.

REFERENCIAS

- Atenas, B. (1998). Experimentos con dos herramientas de modelación de paraderos de buses: IRENE y PASSION. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- EBTU (1982). **Tratamento preferencial ao transporte coletivo por ônibus**. Empresa Brasileira dos Transportes Urbanos, Ministerio dos Transportes, Brasilia.
- Cowan, J. R. (1975) Useful headway models. *Transportation Research* **9**, 371-375.
- Fernández, R. (2001a). **Modelling bus stop interactions**. PhD Thesis, University of London.
- Fernández, R. (2001b). A new approach to bus stop modelling. *Traffic Engineering and Control* **42**, 240-246.
- Fernández, R. and R. Planzer. (2002). Review of the capacity of road-based transit system. *Transport Reviews* **22**, 267-293.
- Gibson, J., I. Baeza and L.G. Willumsen. (1989). Bus stops, congestion and congested bus stops. *Traffic Engineering and Control* **30**, 291-296.
- Gibson, J., R. Fernández y A. Albert. (1997). Operación en paraderos formales en Santiago. *Actas del VIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, Santiago, 397-408.
- Gibson, J. y R. Fernández. (1995). Recomendaciones para el diseño de paraderos de buses de alta capacidad. *Apuntes de Ingeniería* **18**, 35-50.
- Moreno, C. (2004). Nueva versión del modelo PASSION de simulación de operaciones en paraderos de transporte público. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- TfL (2000). **Bus stop layouts for low floor bus accessibility**. London Bus Initiative, Transport for London, London (www.tfl.gov.uk/buses).
- TRB (2000). **Highway Capacity Manual, HCM2000**, Special Report 209, Transportation Research Board, Washington, D.C.

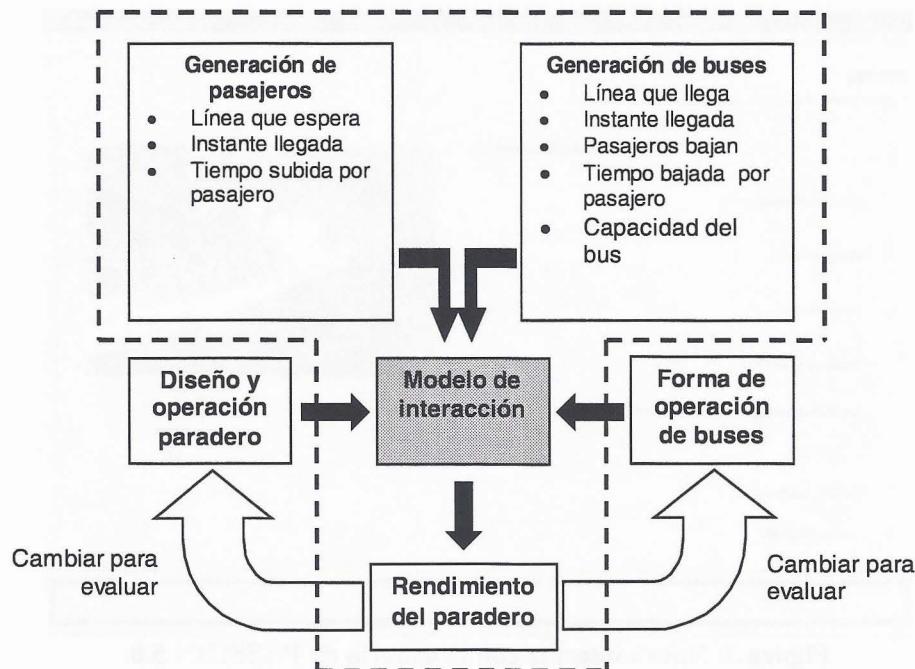


Figura 1: Componentes de PASSION.

```

*****
* PASSION 4.2 : Parallel Stop Simulation - R.Fernandez (2000) *
*****
Data of this run:
=====
Stop identification : My_example_run
Routes using the stop : 1 routes
Simulation period : 52 min
Bus flow : 22 bus/h (sd bus headways: 122.13 s)
Boarding demand : 390 pass/h (sd pas arrivals: 14.82 s)
Alighting demand : 67 pass/h
Two doors, parallel boardings and alightings...
Free exit...

Results of this run:
=====
Mean pas waiting time : 1.63 min (max: 6.12 sd: 1.46)
Mean pas on platform : 17.79 pass (max: 49.00)

Mean bus pas delay : 37.11 s/bus (max: 99.34 sd: 29.44)
Mean bus extra delay : 0.00 s/bus (max: 0.00 sd: 0.00)
Mean bus queue delay : 5.62 s/bus (max: 69.42 sd: 17.66)
Mean bus total delay : 47.73 s/bus (max: 104.34 sd: 31.24)

Berth capacity : 85.50 bus/h (sat: 0.26)
Mean bus queue length : 0.03 buses (max: 1.00)
Exit time deviation : 151.24 s

Queue characteristics :
-----
Queue Freq Q.Time
(bus) (%) (s)
0 89 0
1 11 53

```

Figura 2: Ejemplo de salida de PASSION 4.2.

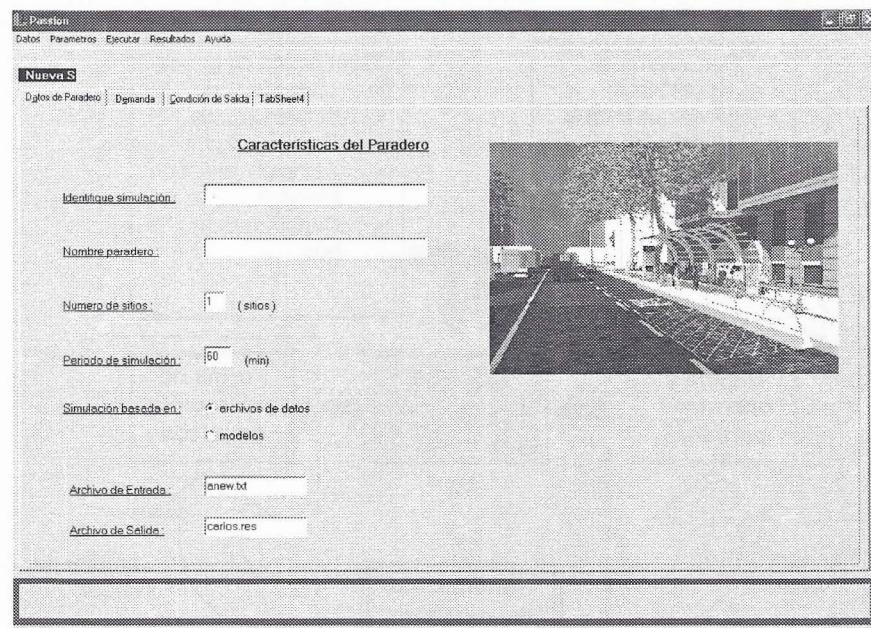


Figura 3: Nueva interfaz con el usuario de PASSION 5.0.

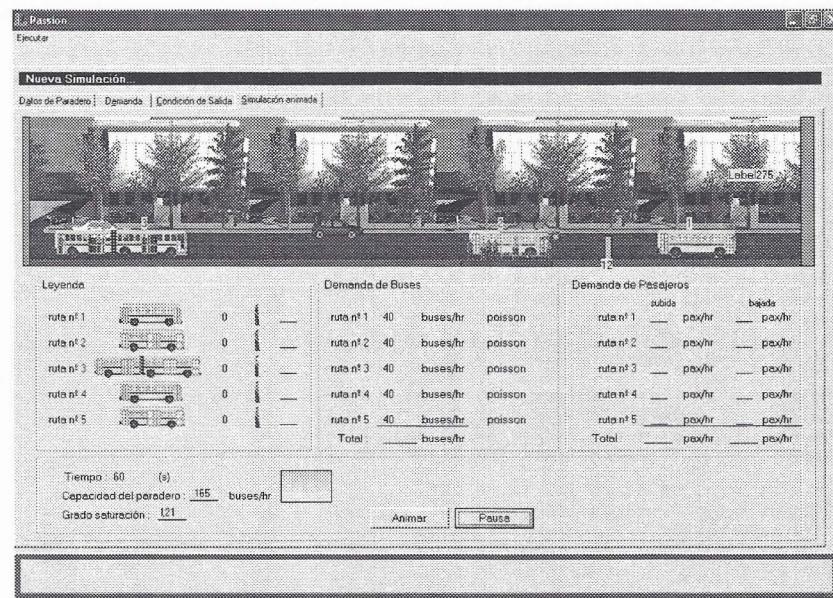


Figura 4: Pantalla de simulación animada de PASSION 5.0.

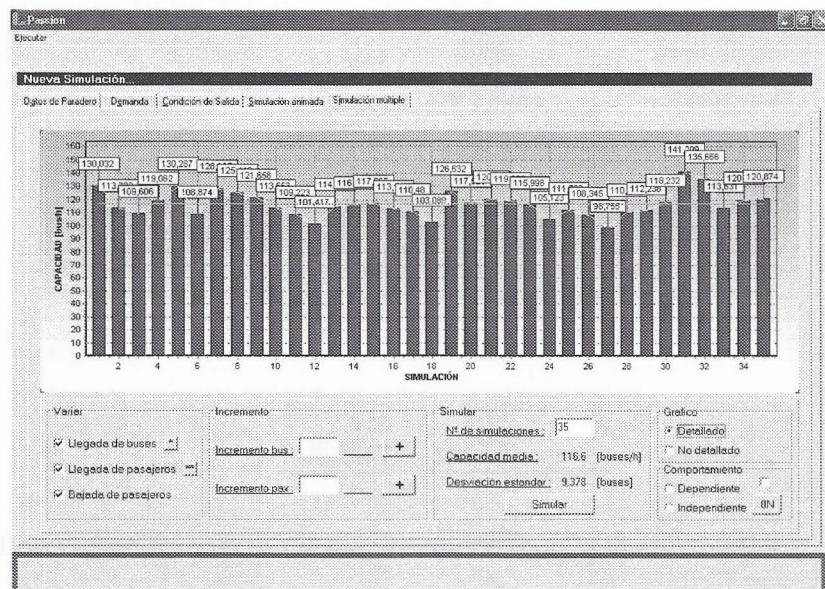


Figura 5: Pantalla de resultados de corridas múltiples.

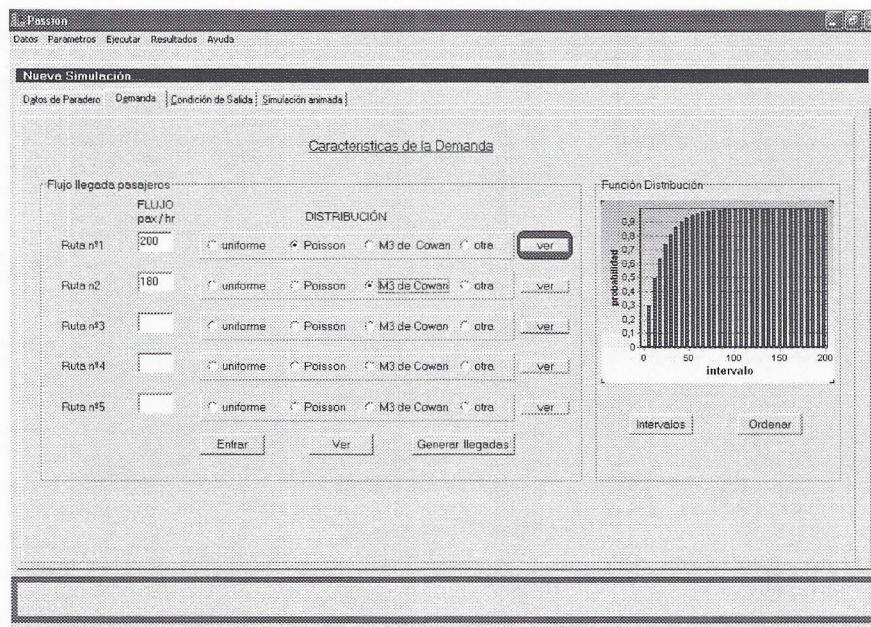


Figura 6: Pantalla de generación de llegadas al paradero.

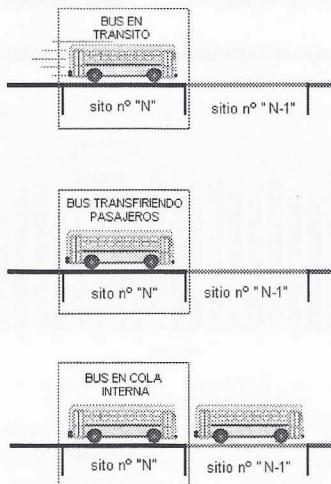
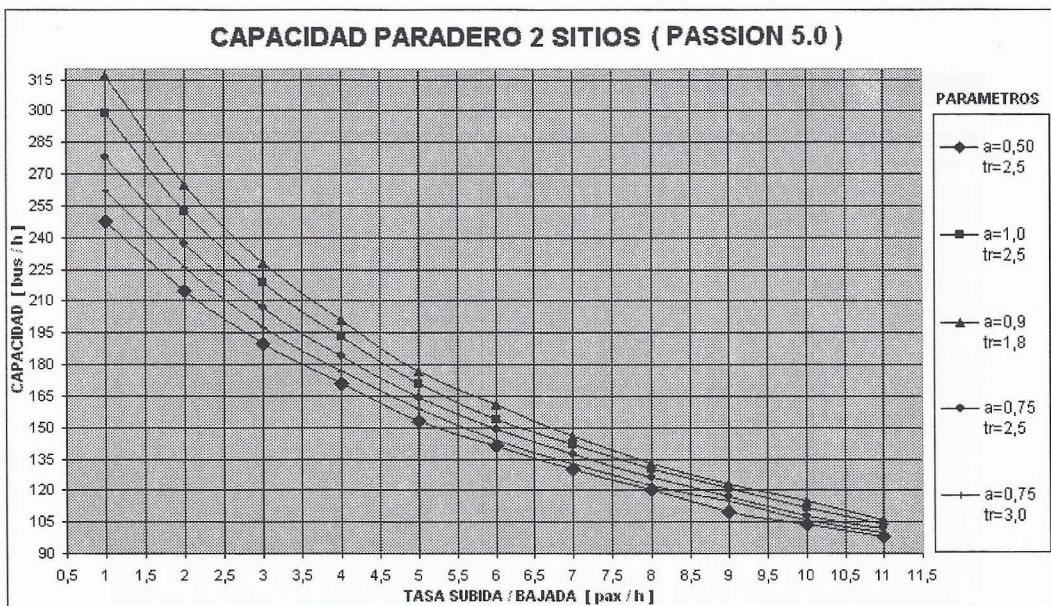


Figura 7: Estados de un bus en el último sitio de un paradero de sitios múltiples.



Parámetros: a = promedio de tasa de aceleración y frenado de buses; t_r = tiempo de reacción de conductores

Figura 8: Capacidad de un paradero de dos sitios según PASSION 5.0 (Moreno 2004).