Comprendiendo la “*danger zone*” de los servicios expresos usando simulación

Homero Larraín, Juan Carlos Muñoz, Carlos Olivos

Pontificia Universidad Católica de Chile

¿Qué es la “Danger Zone”?

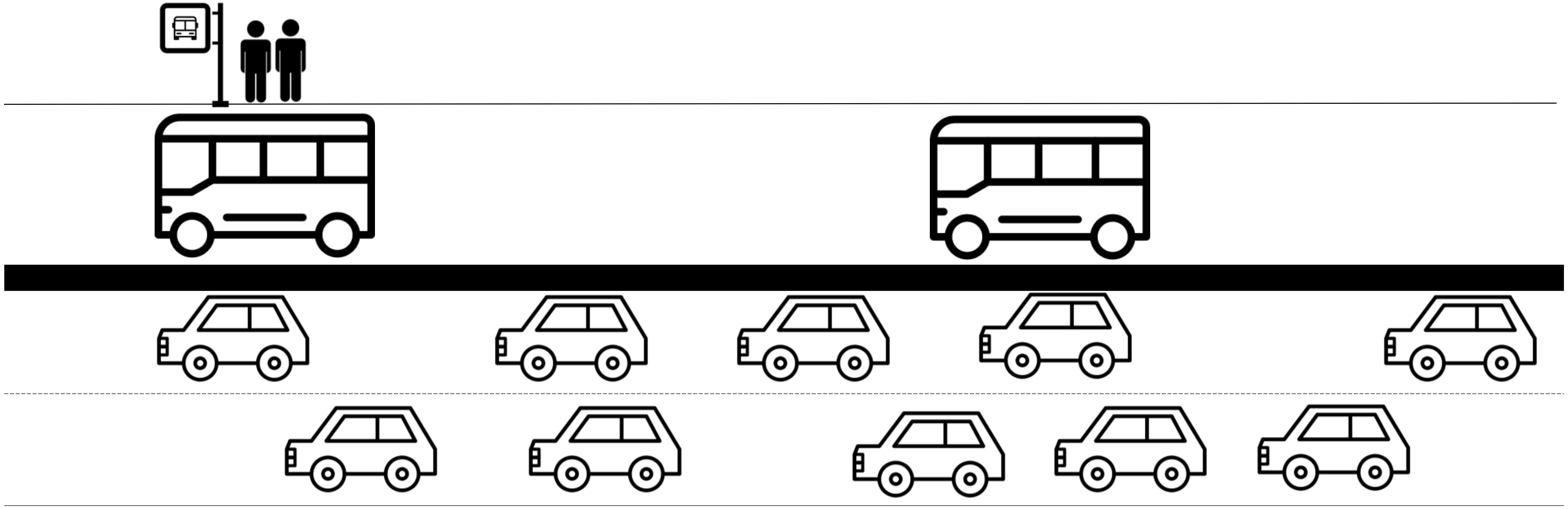
¿Qué es la “Danger Zone”?

En un BRT con un servicio expreso y otro no expreso, al aumentar la frecuencia del servicio expreso, la espera media en el sistema aumenta.

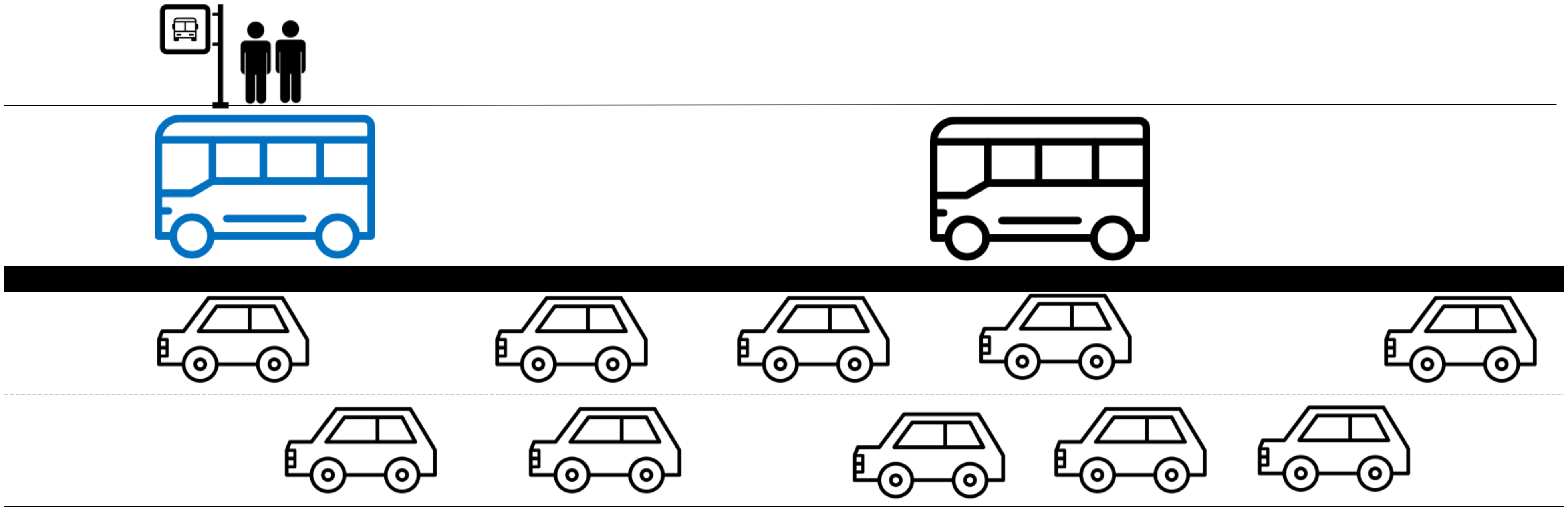
Parte 1

UN CASO SENCILLO

Estudiemos un corredor sencillo, sobre el cual operan dos servicios diferentes:

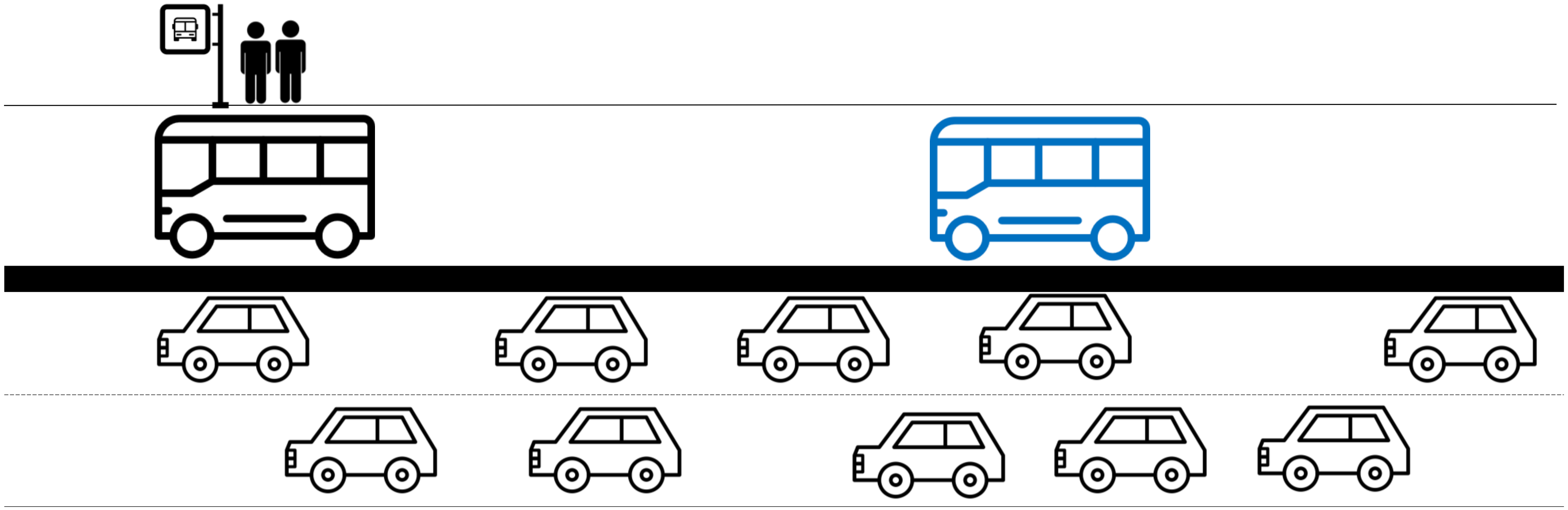


Estudiemos un corredor sencillo, sobre el cual operan dos servicios diferentes:



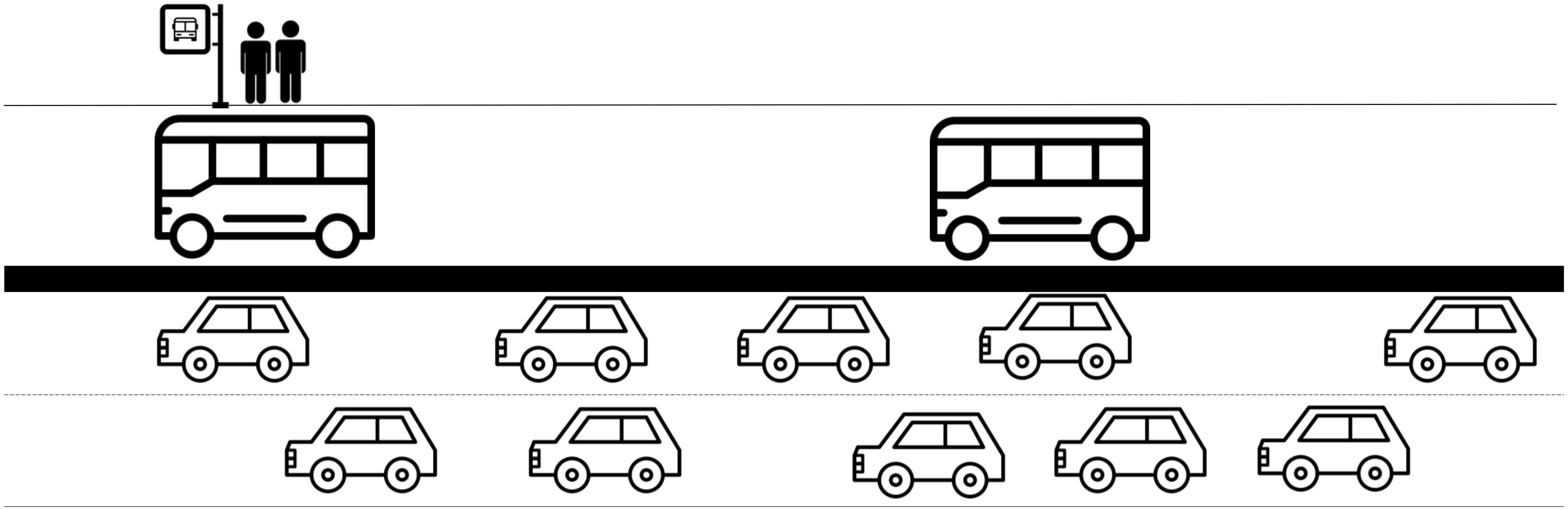
Un servicio regular (o “*all-stop*”) que se detiene en cada estación, con frecuencia f_A.

Estudiemos un corredor sencillo, sobre el cual operan dos servicios diferentes:



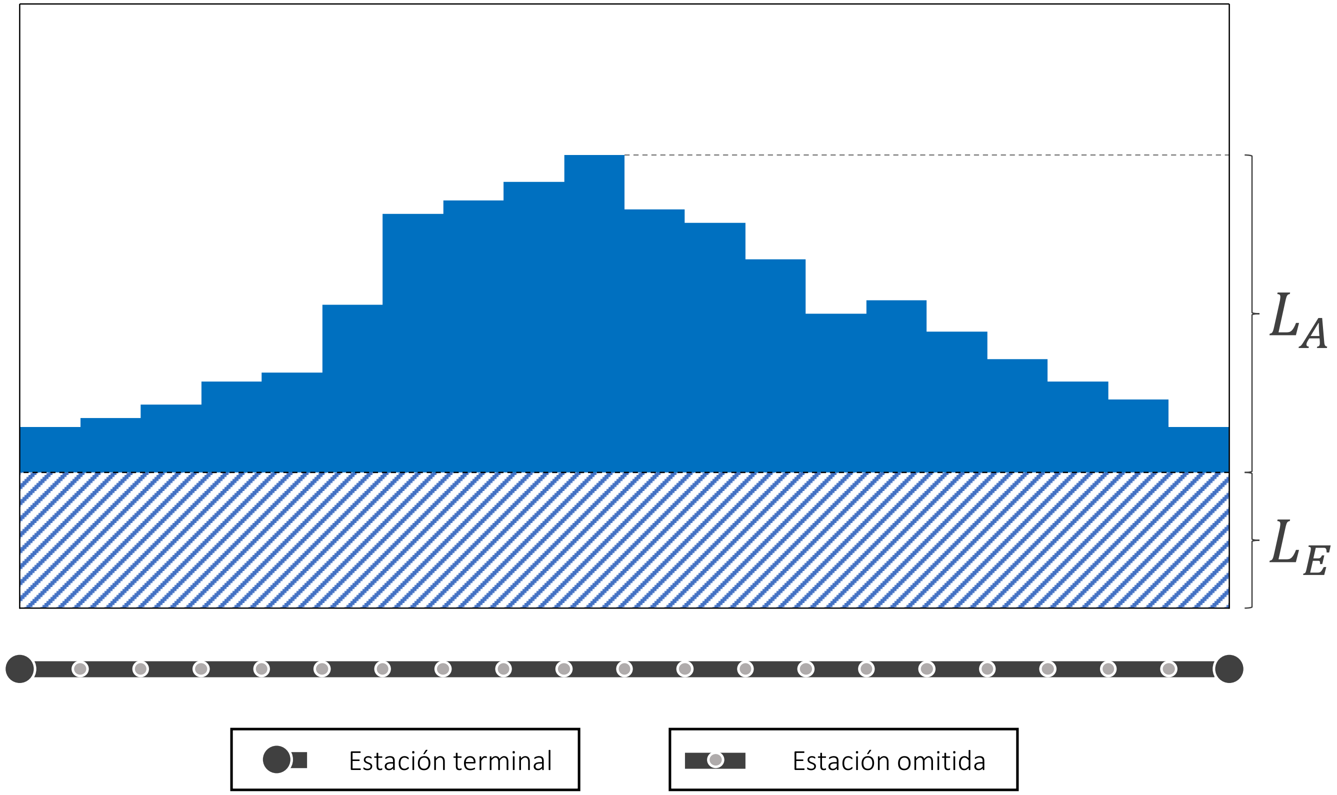
Y un servicio expreso que viaja directo de terminal a terminal, con frecuencia f_E.

Estudiemos un corredor sencillo, sobre el cual operan dos servicios diferentes:

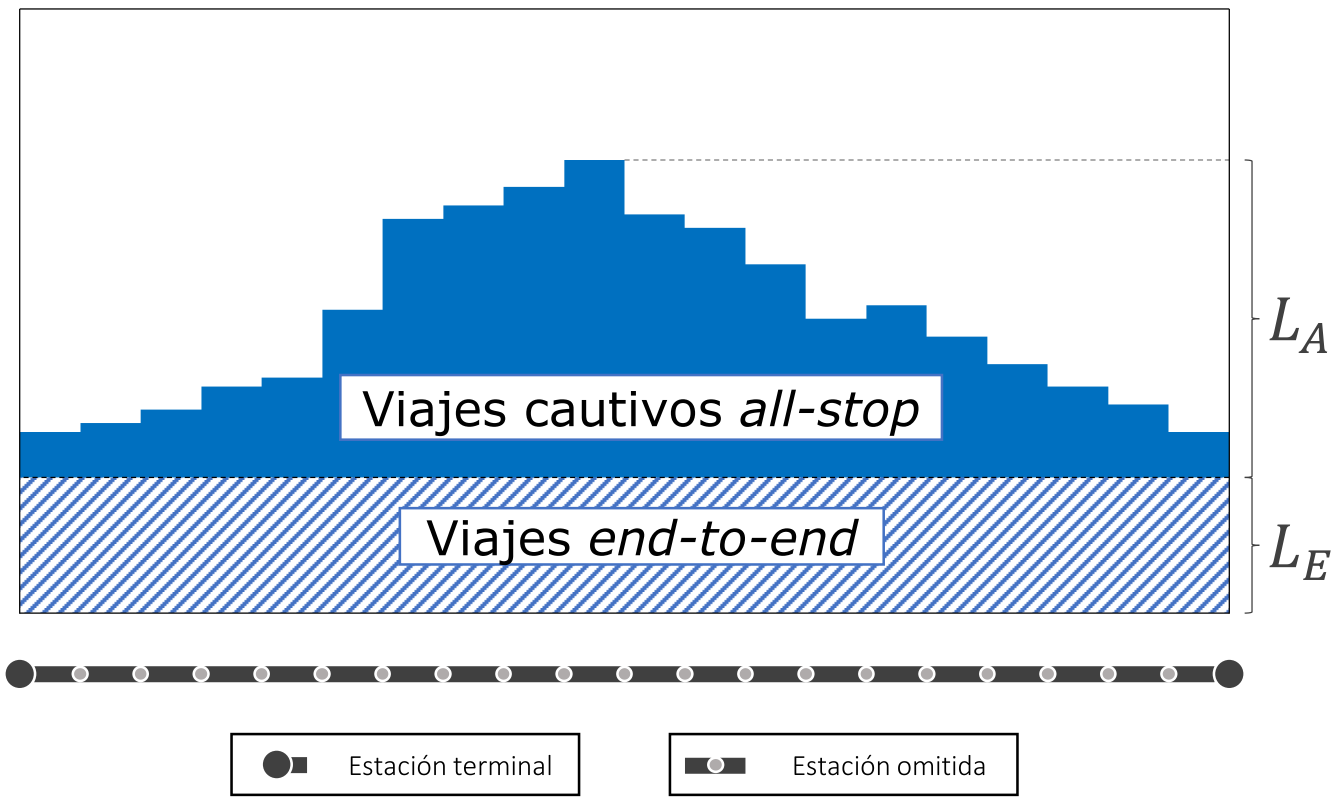


Ambos servicios operan con buses con capacidad para b pasajeros.

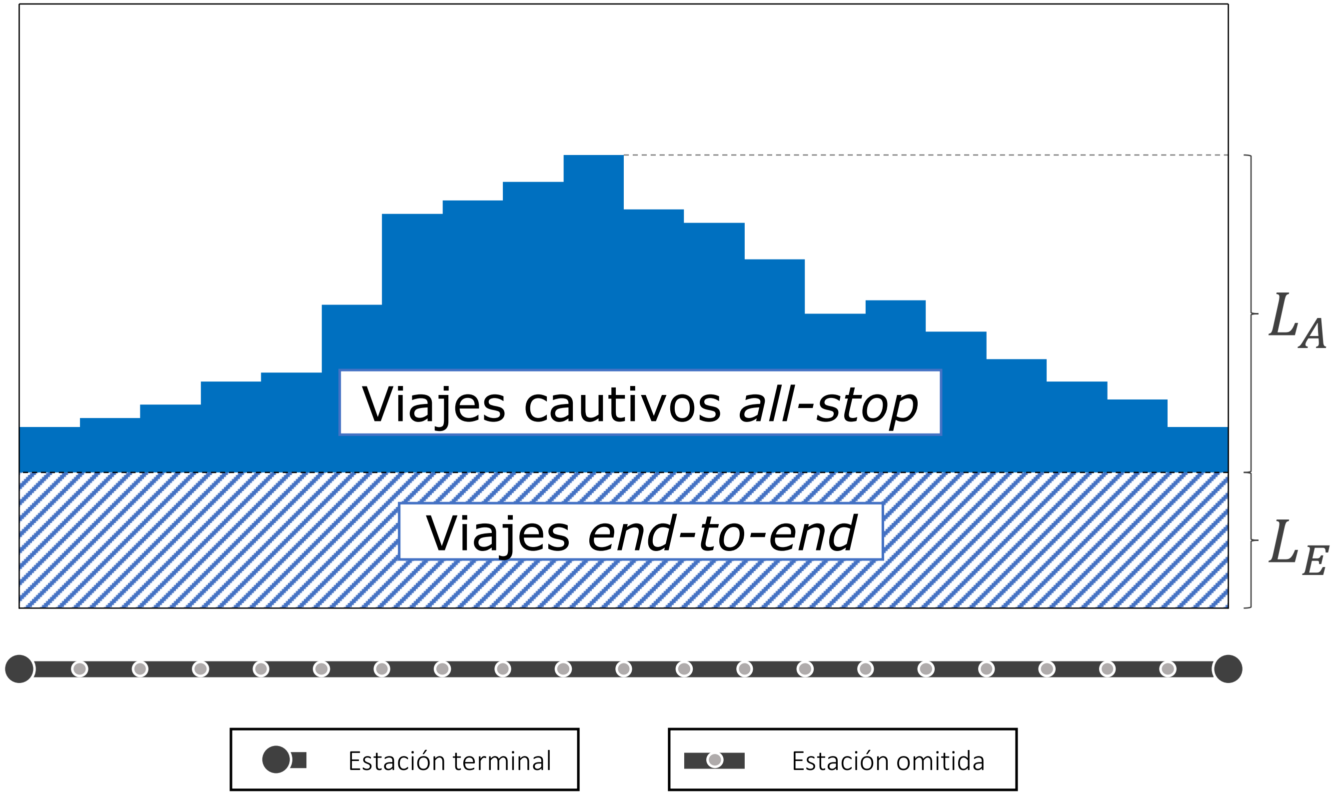
El perfil de demanda del corredor será algo así:



El perfil de demanda del corredor será algo así:



El perfil de demanda del corredor será algo así:



Es decir, existen dos tipos de servicio, y dos tipos de usuario.

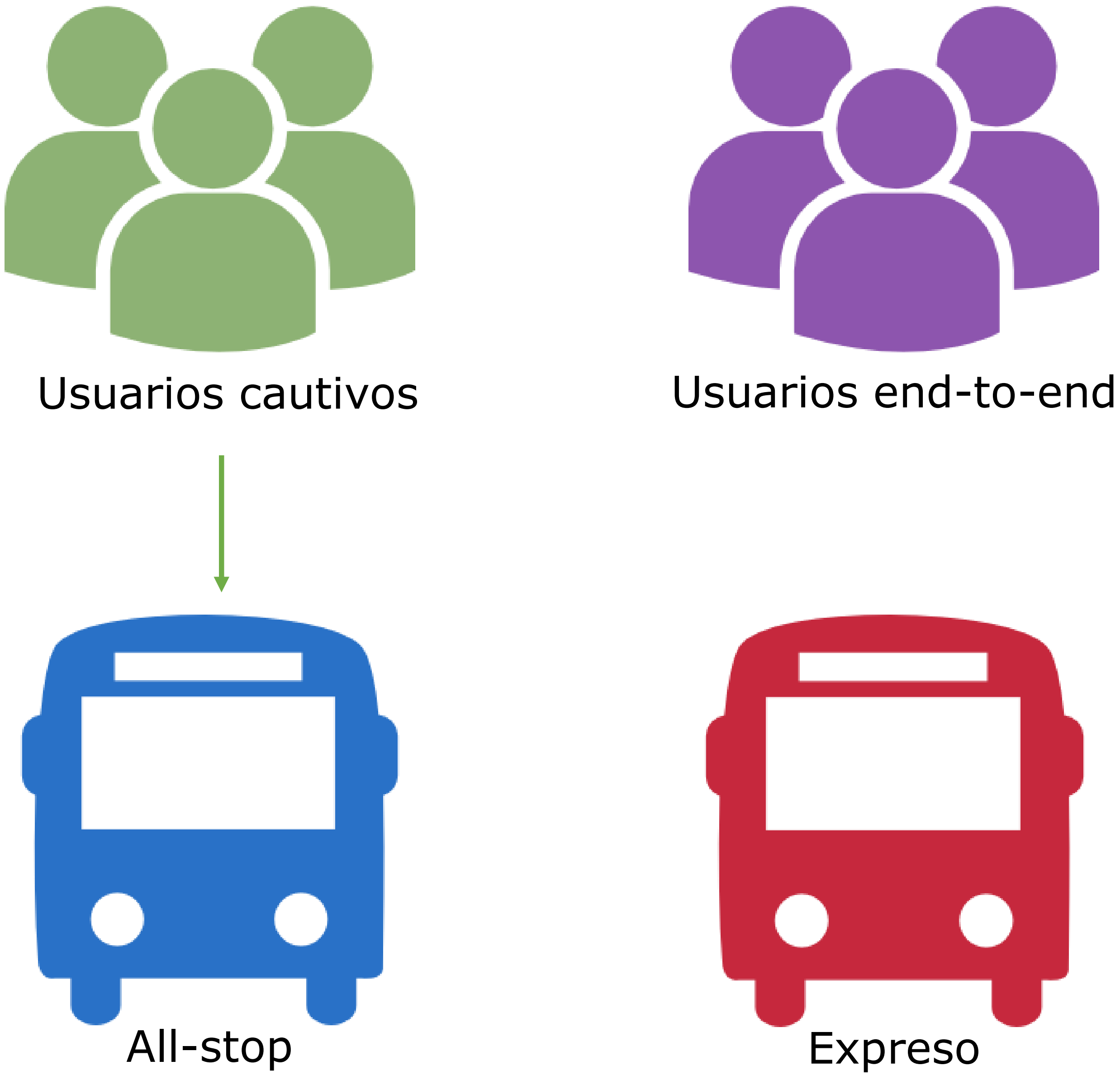
Usuarios cautivos

Usuarios end-to-end

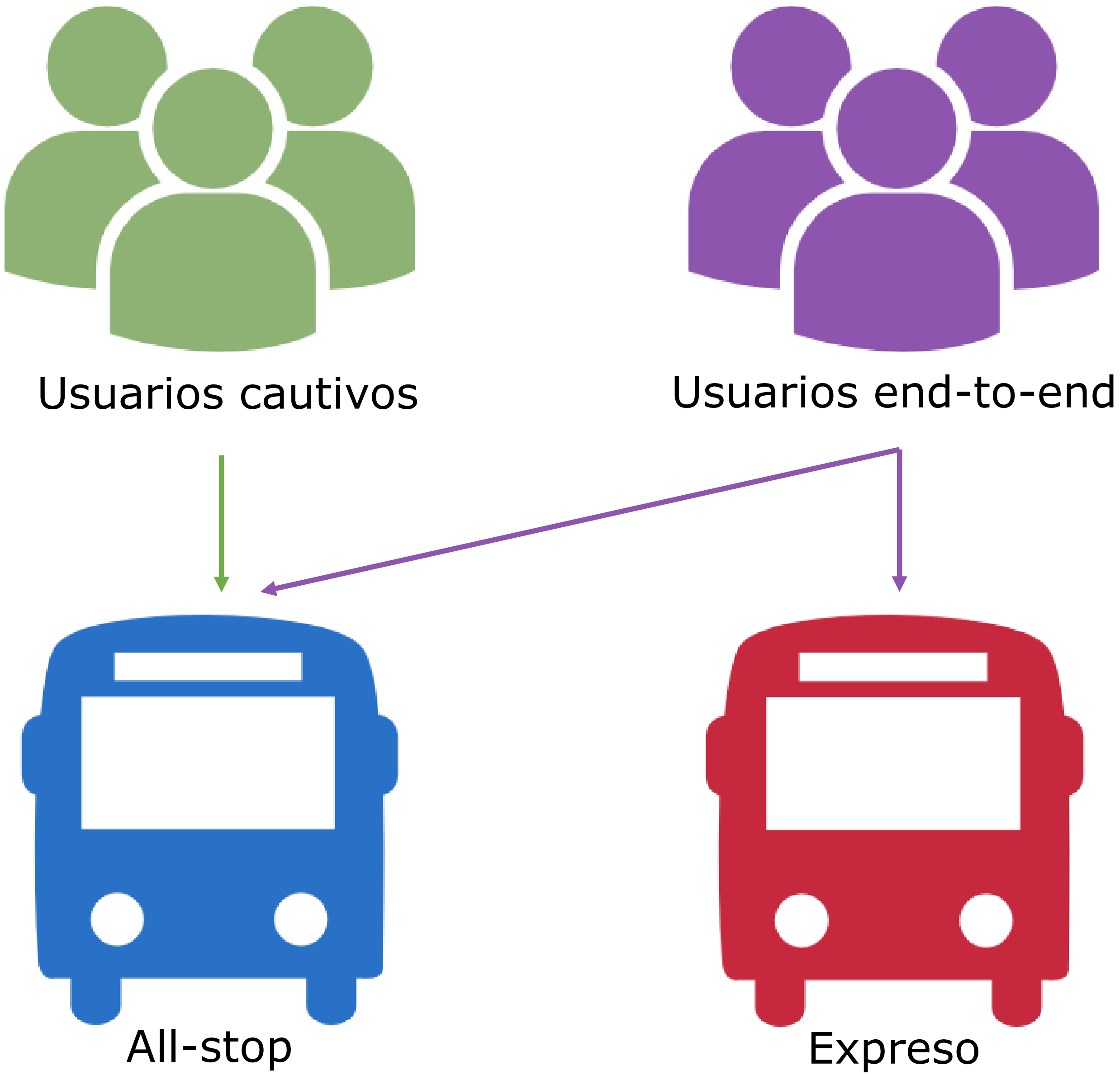
All-stop

Expreso

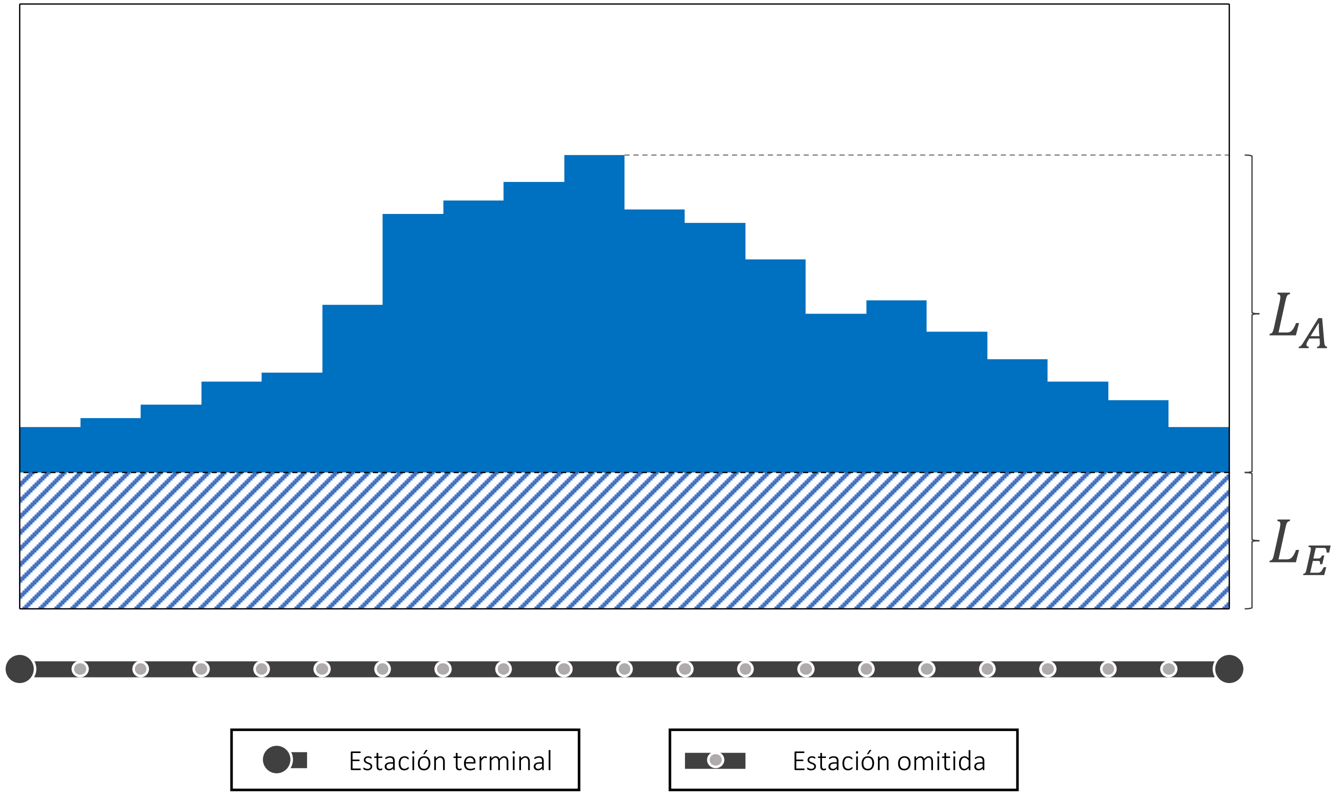
Vectores por Freepik en www.flaticon.com



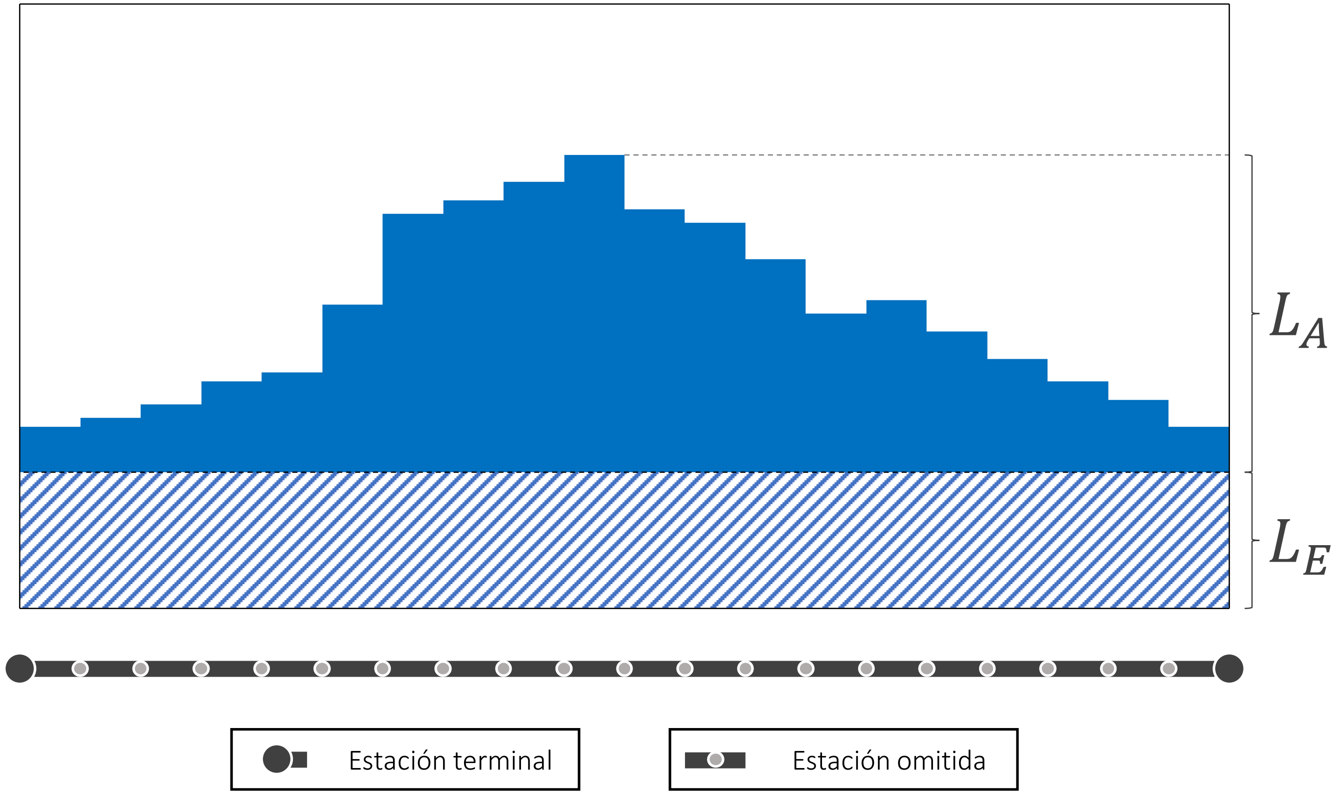
Vectores por Freepik en www.flaticon.com


Usuarios cautivos
Usuarios end-to-end
All-stop
Expreso

¿Qué condición garantiza que el sistema tenga suficiente capacidad?

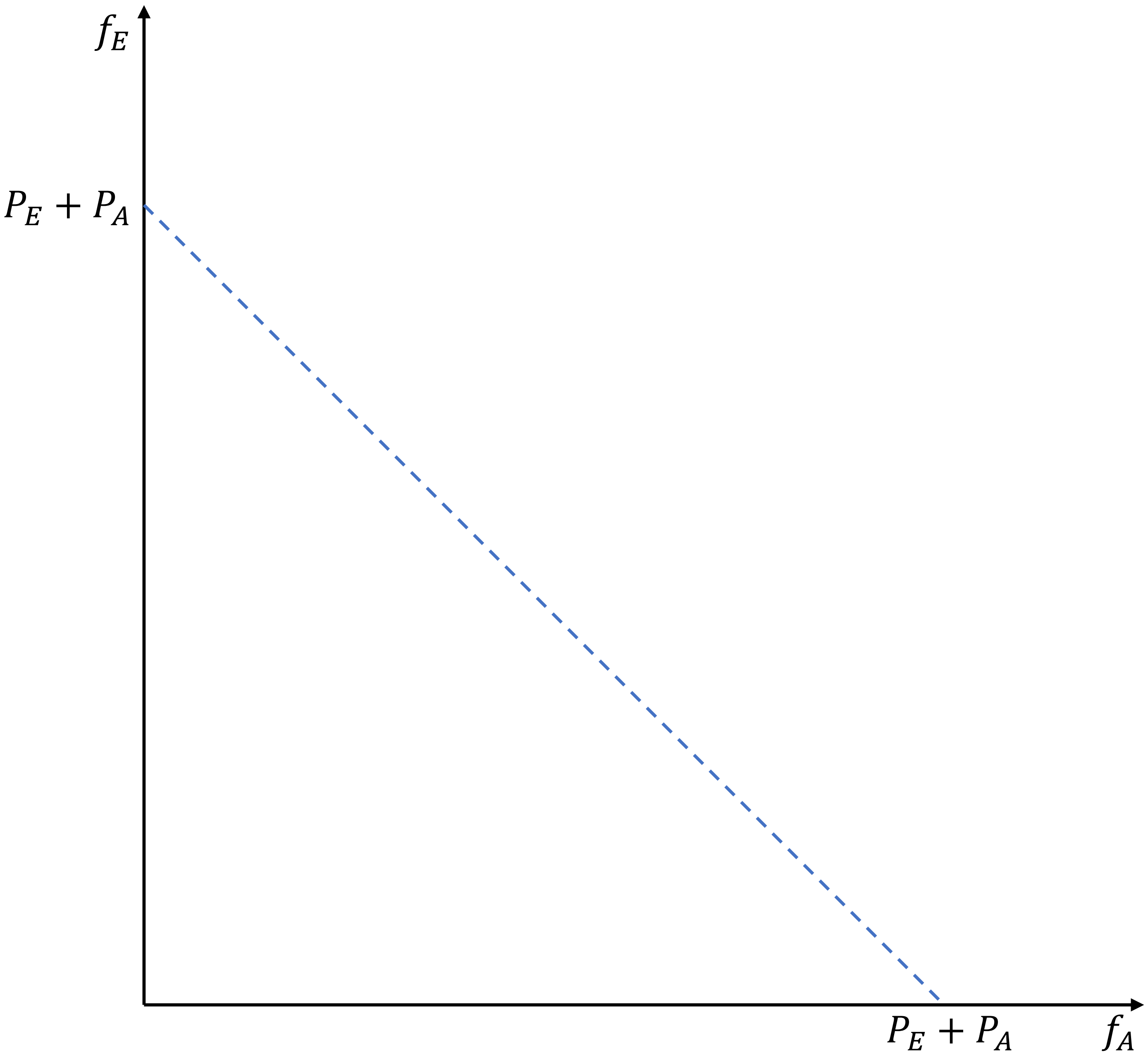


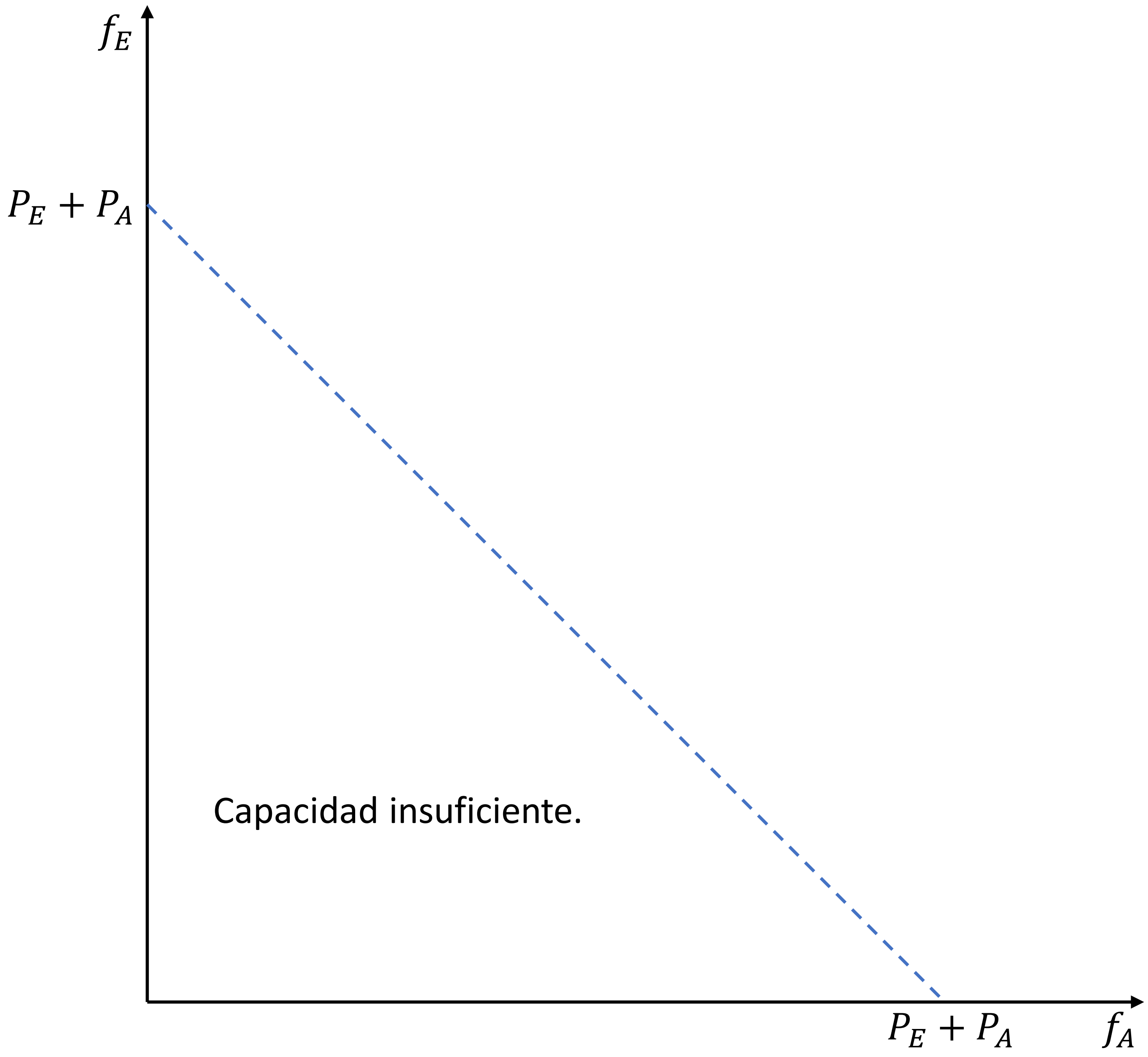
¿Qué condición garantiza que el sistema tenga suficiente capacidad?

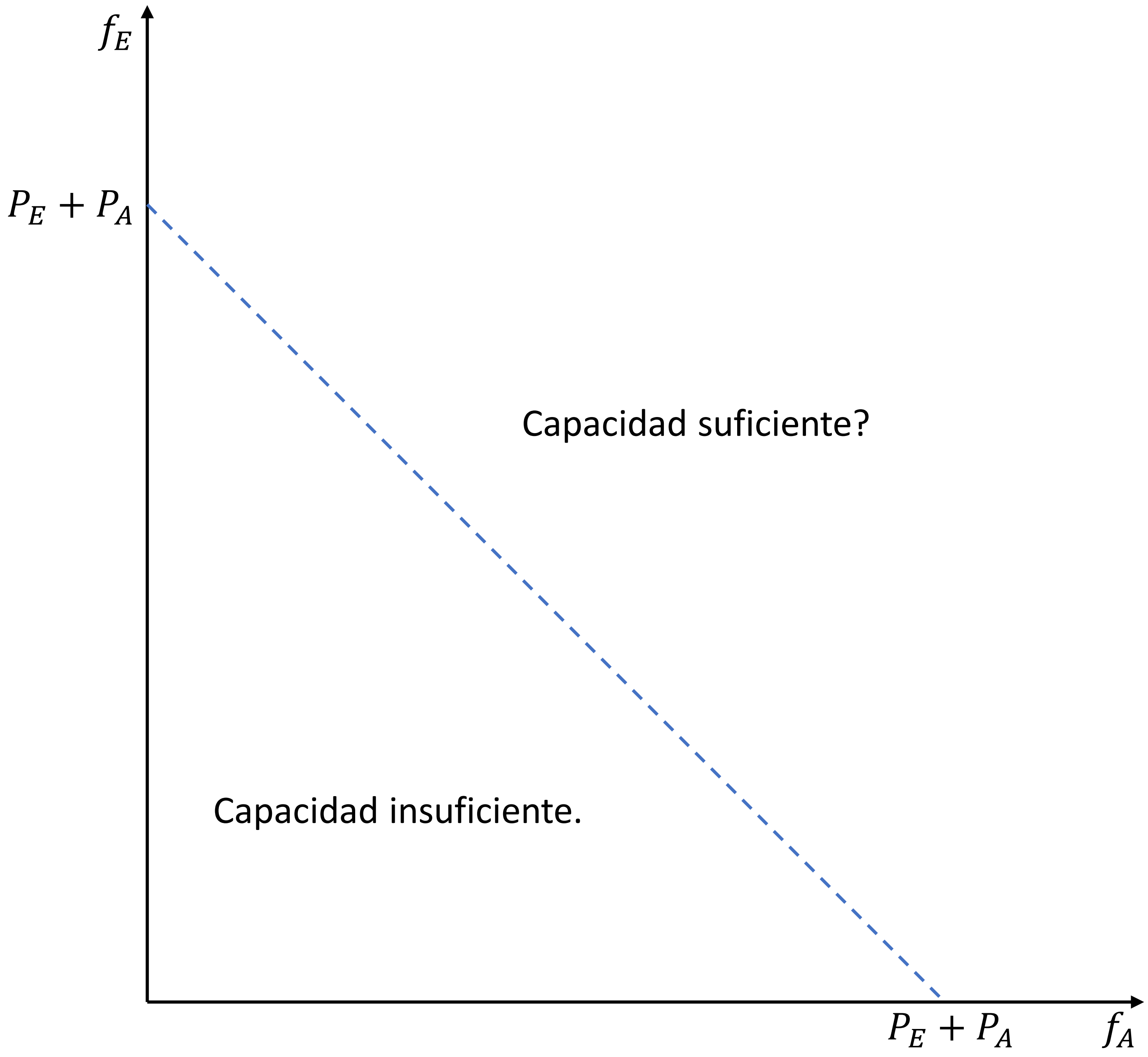


Debemos proveer suficiente capacidad para el segmento crítico:

$$f_A + f_E \geq (L_A + L_E)/b = P_A + P_E$$


f_E
$P_E + P_A$
$P_E + P_A$
f_A


f_E
$P_E + P_A$
Capacidad insuficiente.
$P_E + P_A$
f_A


f_E
$P_E + P_A$
Capacidad suficiente?
Capacidad insuficiente.
$P_E + P_A$
f_A

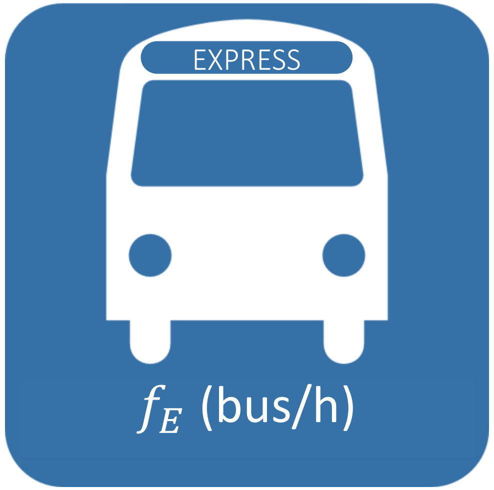
Debemos verificar que cada servicio provea suficiente capacidad para todo pasajero que lo desee abordar. Si no, se formarán filas en el paradero!

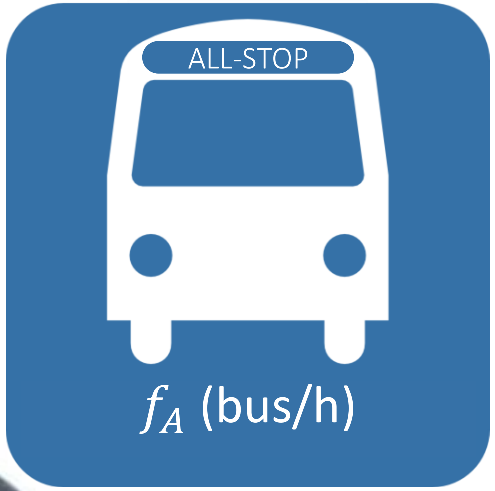
Entonces, qué servicio intentará abordar cada tipo de pasajero?...

Necesitamos estudiar los viajes tipo *end-to-end*.

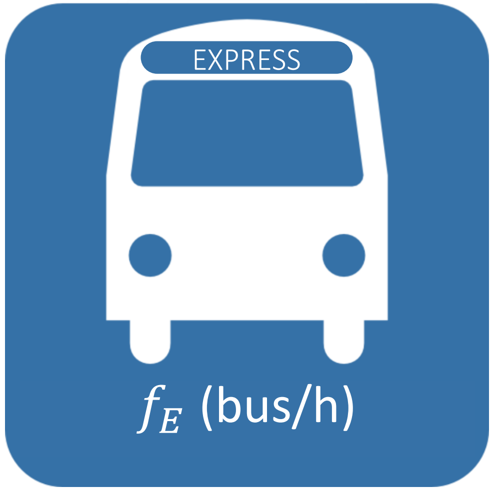
Un viajero *end-to-end* se enfrenta a dos alternativas:

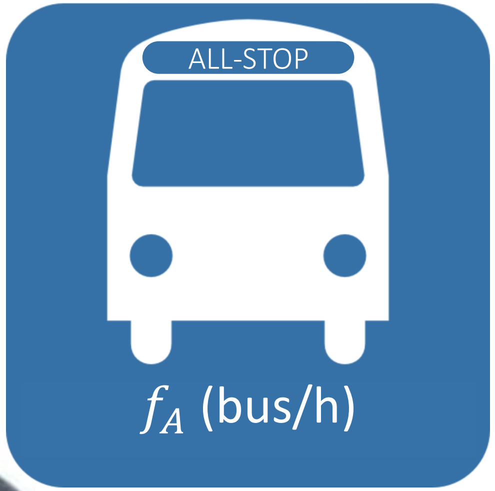
1 Tomar el primer bus que pase.





2 Esperar al expreso, ahorrando τ minutos de tiempo de viaje en vehículo.





Si la frecuencia del expreso es menor que

$$f_E < \hat{f}_E = \frac{0{,}5}{\tau} \qquad (*)$$

entonces los usuarios *end-to-end* prefieren tomar el primer bus que pase.

*Asumiendo que los *headways* son regulares.

Si la frecuencia del expreso es menor que

$$f_E < \hat{f}_E = \frac{0{,}5}{\tau} \qquad (*)$$

entonces los usuarios *end-to-end* prefieren tomar el primer bus que pase.

En este caso debemos asegurar que cada servicio posea capacidad para su demanda. Para el servicio *all-stop* esto implica que:

*Asumiendo que los *headways* son regulares.

Si la frecuencia del expreso es menor que

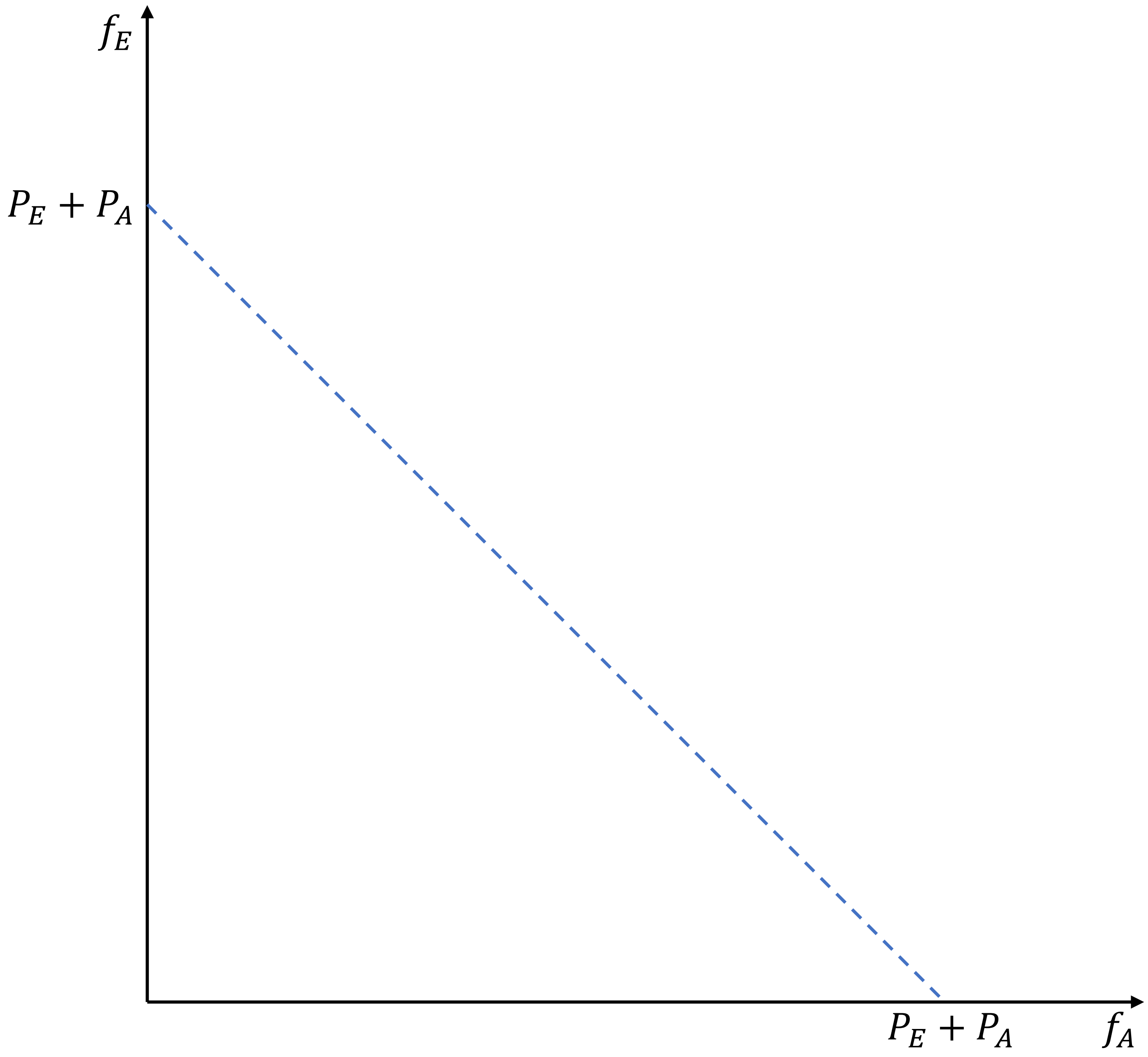
$$f_E < \hat{f}_E = \frac{0{,}5}{\tau} \qquad (*)$$

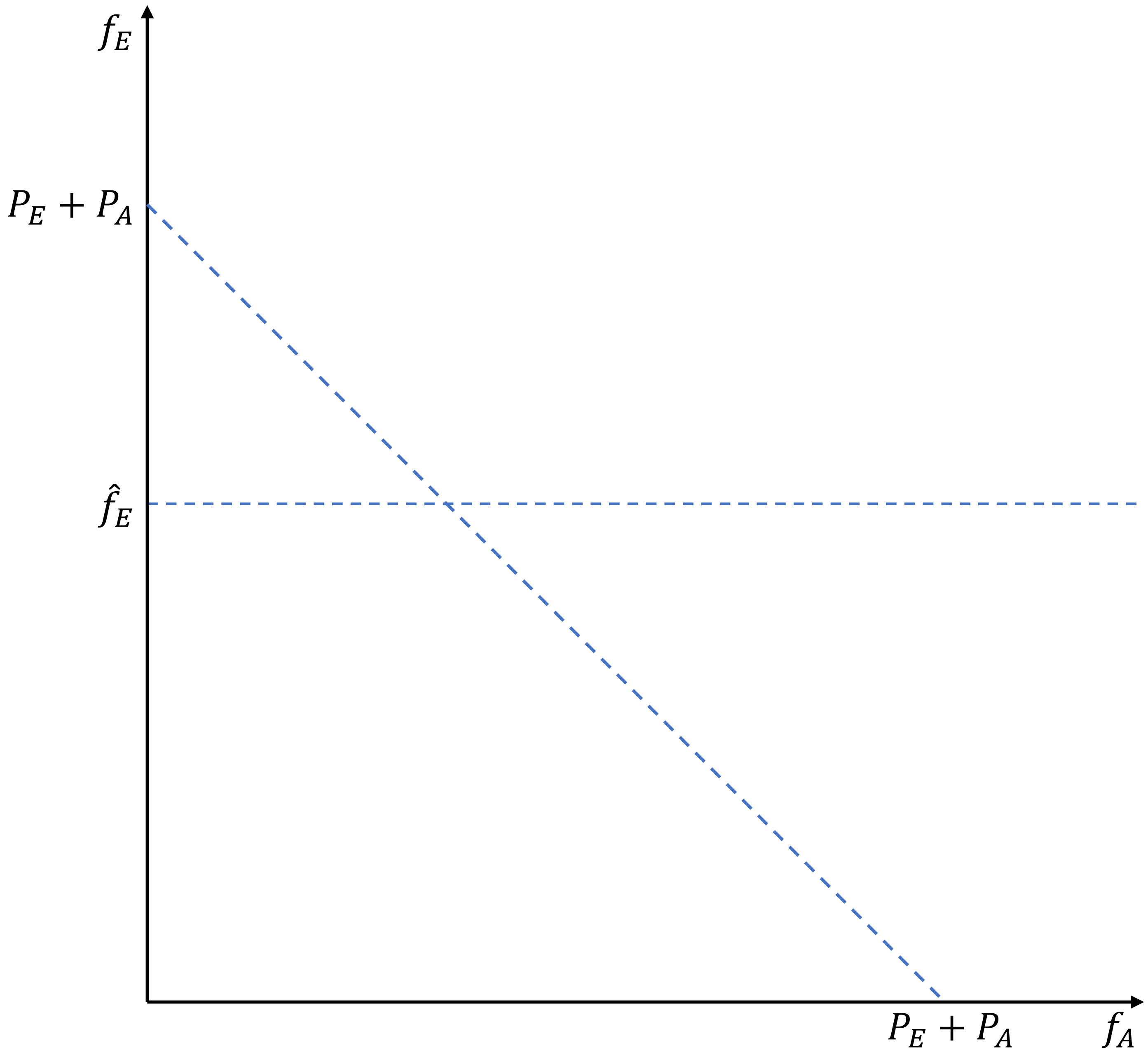
entonces los usuarios *end-to-end* prefieren tomar el primer bus que pase.

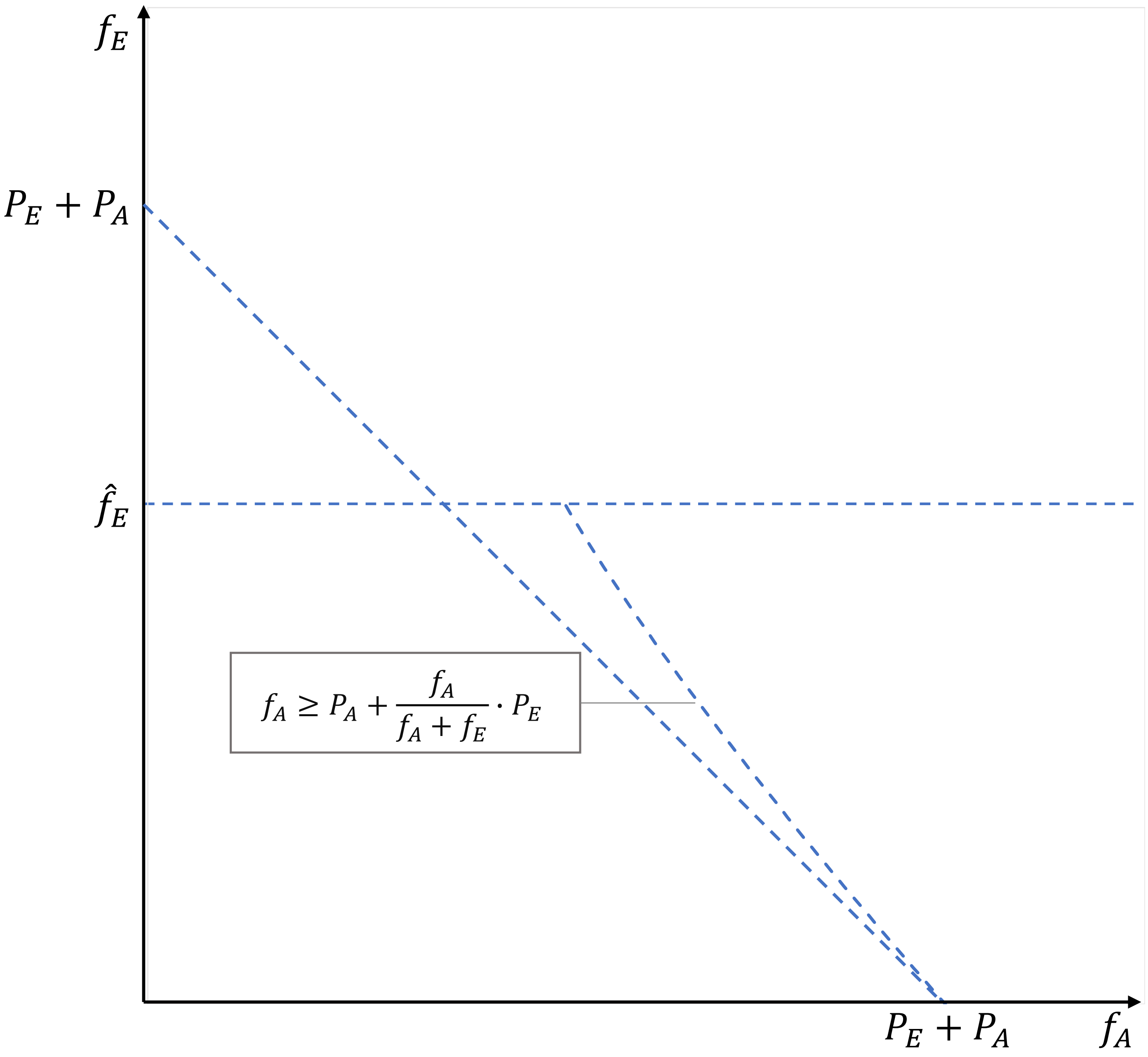
En este caso debemos asegurar que cada servicio posea capacidad para su demanda. Para el servicio *all-stop* esto implica que:

$$f_A \geq P_A + \frac{f_A}{f_A + f_E} \cdot P_E$$

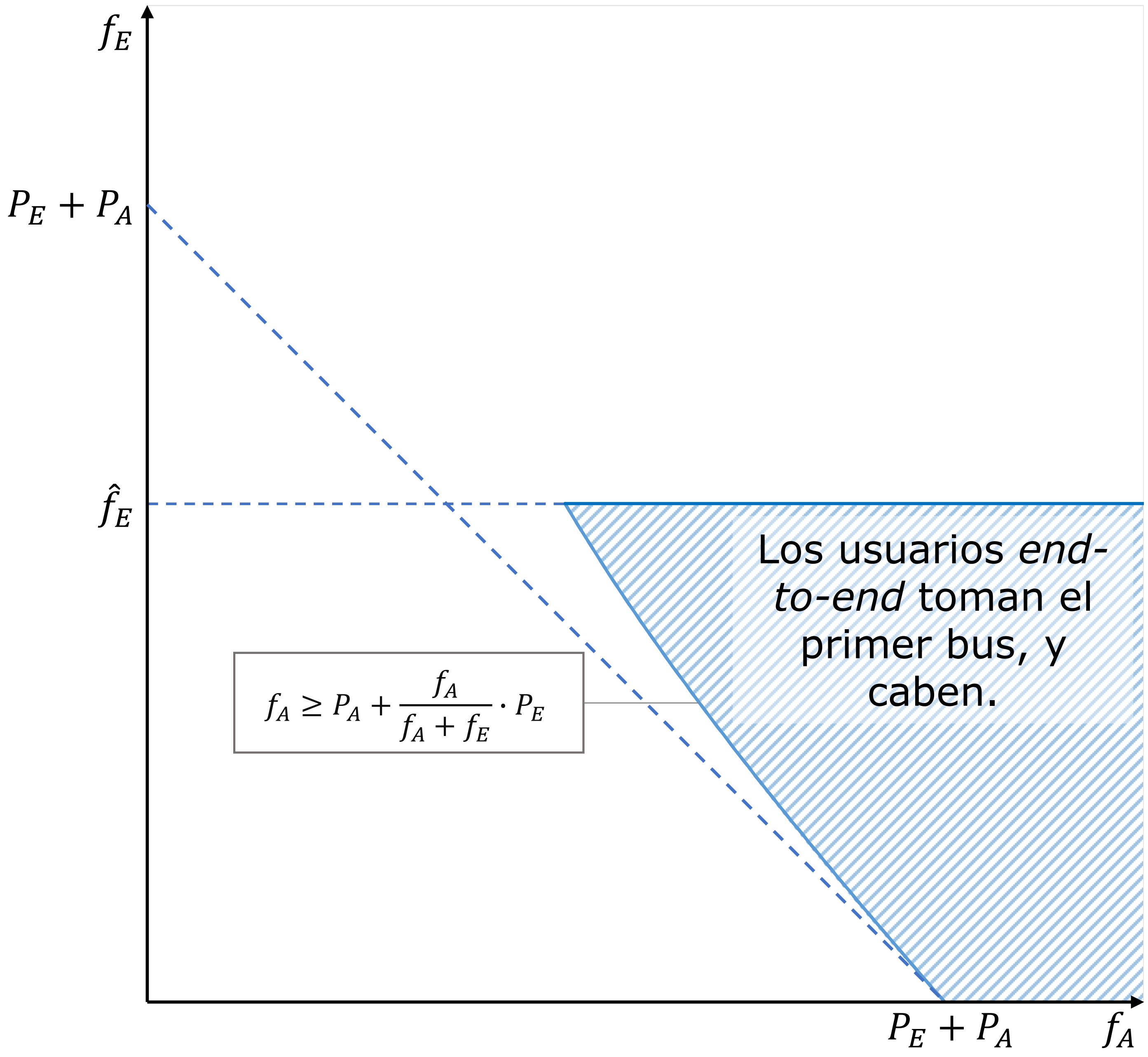
*Asumiendo que los *headways* son regulares.


f_E
$P_E + P_A$
$P_E + P_A$
f_A


f_E
$P_E + P_A$
$\hat{f}_E$
$P_E + P_A$
f_A



f_E
$P_E + P_A$
$\hat{f}_E$
$f_A \geq P_A + \frac{f_A}{f_A + f_E} \cdot P_E$
$P_E + P_A$
f_A



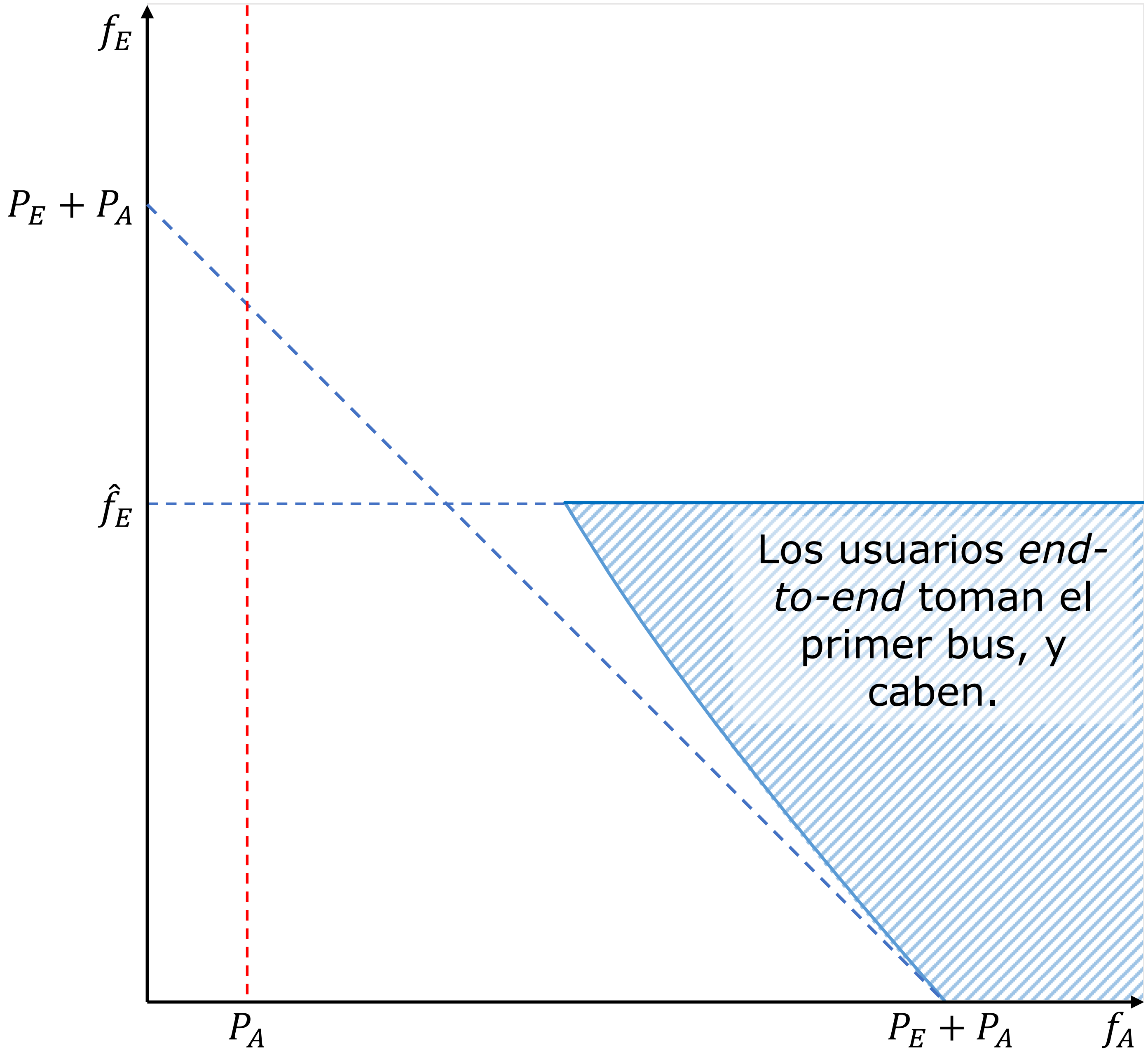
f_E
$P_E + P_A$
$\hat{f}_E$
Los usuarios *end-to-end* toman el primer bus, y caben.
$f_A \geq P_A + \frac{f_A}{f_A + f_E} \cdot P_E$
$P_E + P_A$
f_A

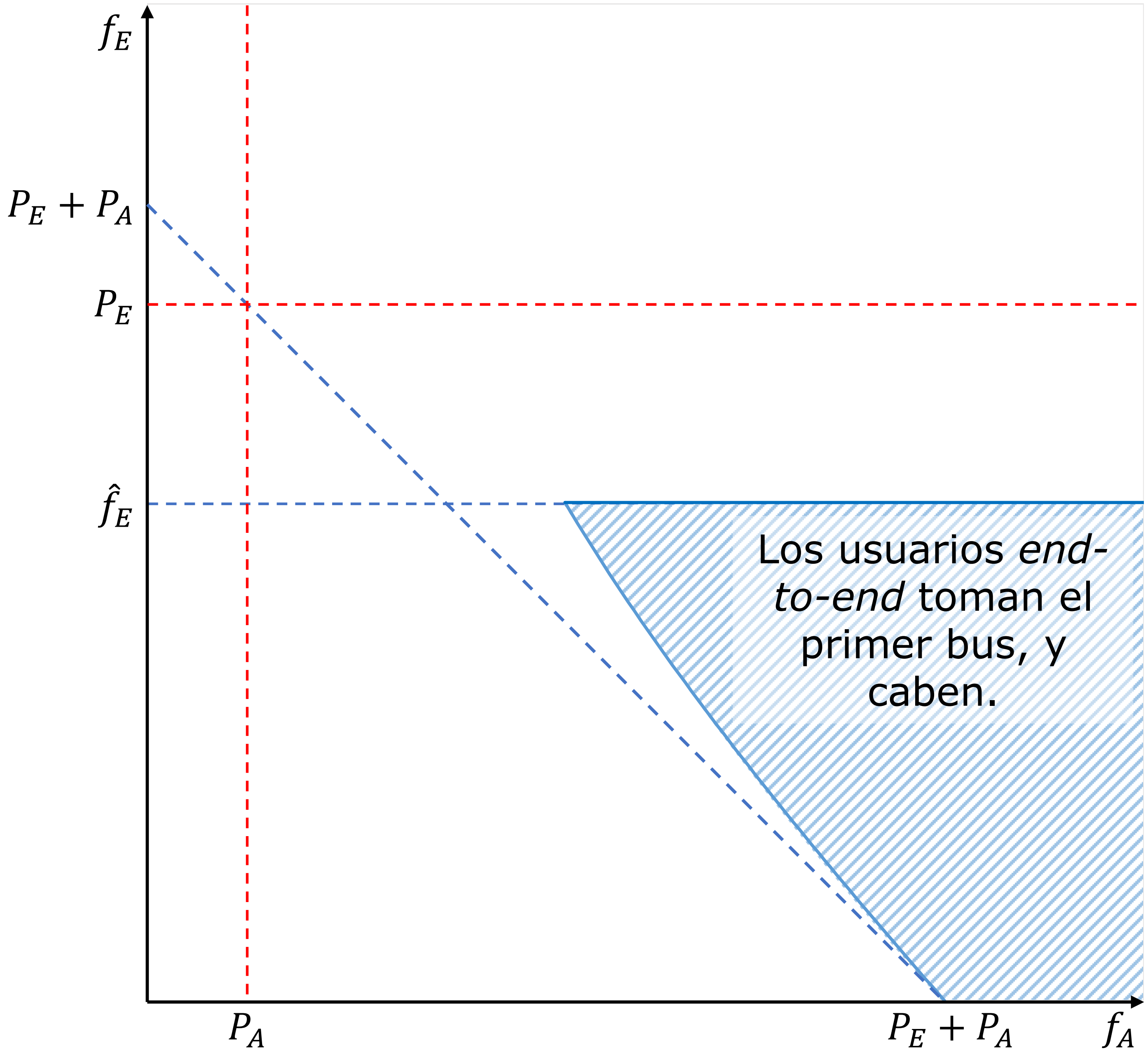
Ahora, si la frecuencia del servicio expreso es mayor que el umbral,

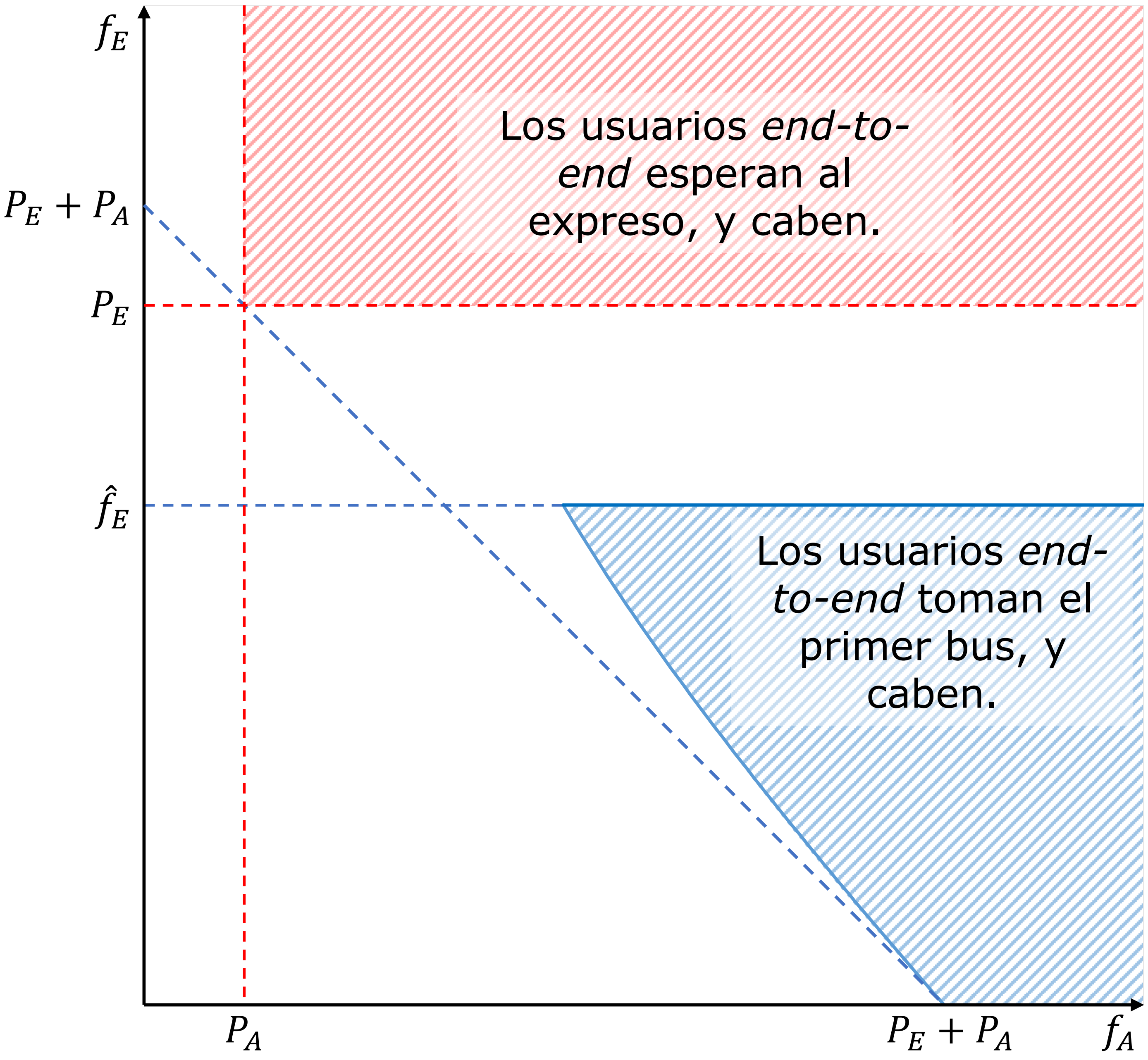
$$f_E > \hat{f}_E = \frac{0,5}{\tau}$$

a los usuarios *end-to-end* les conviene esperar un bus expreso.

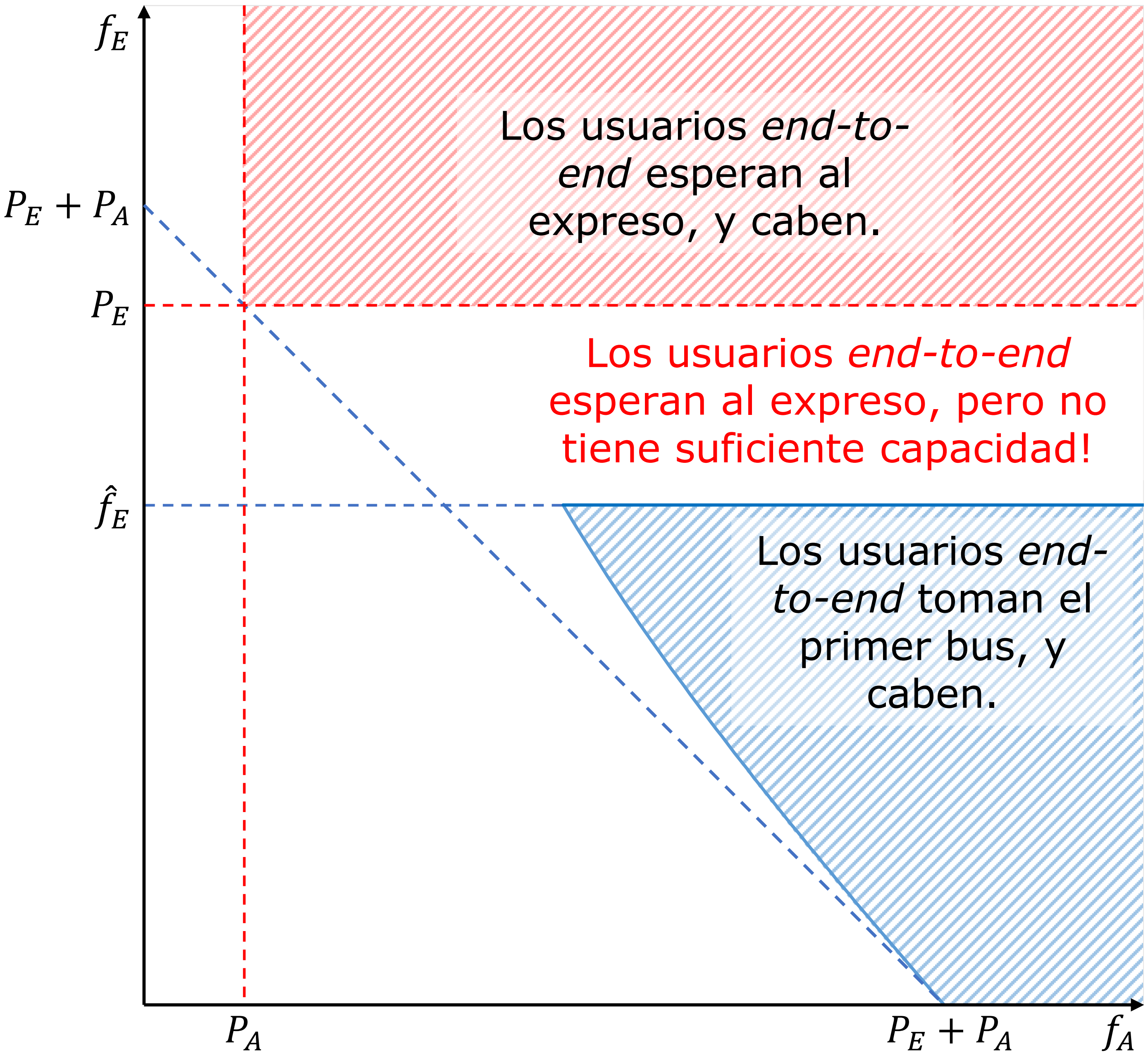
La capacidad de cada servicio debe ser suficiente para acarrear su propia demanda: $f_A > P_A$ y $f_E > P_E$.


f_E
$P_E + P_A$
$\hat{f}_E$
Los usuarios *end-to-end* toman el primer bus, y caben.
P_A
$P_E + P_A$
f_A

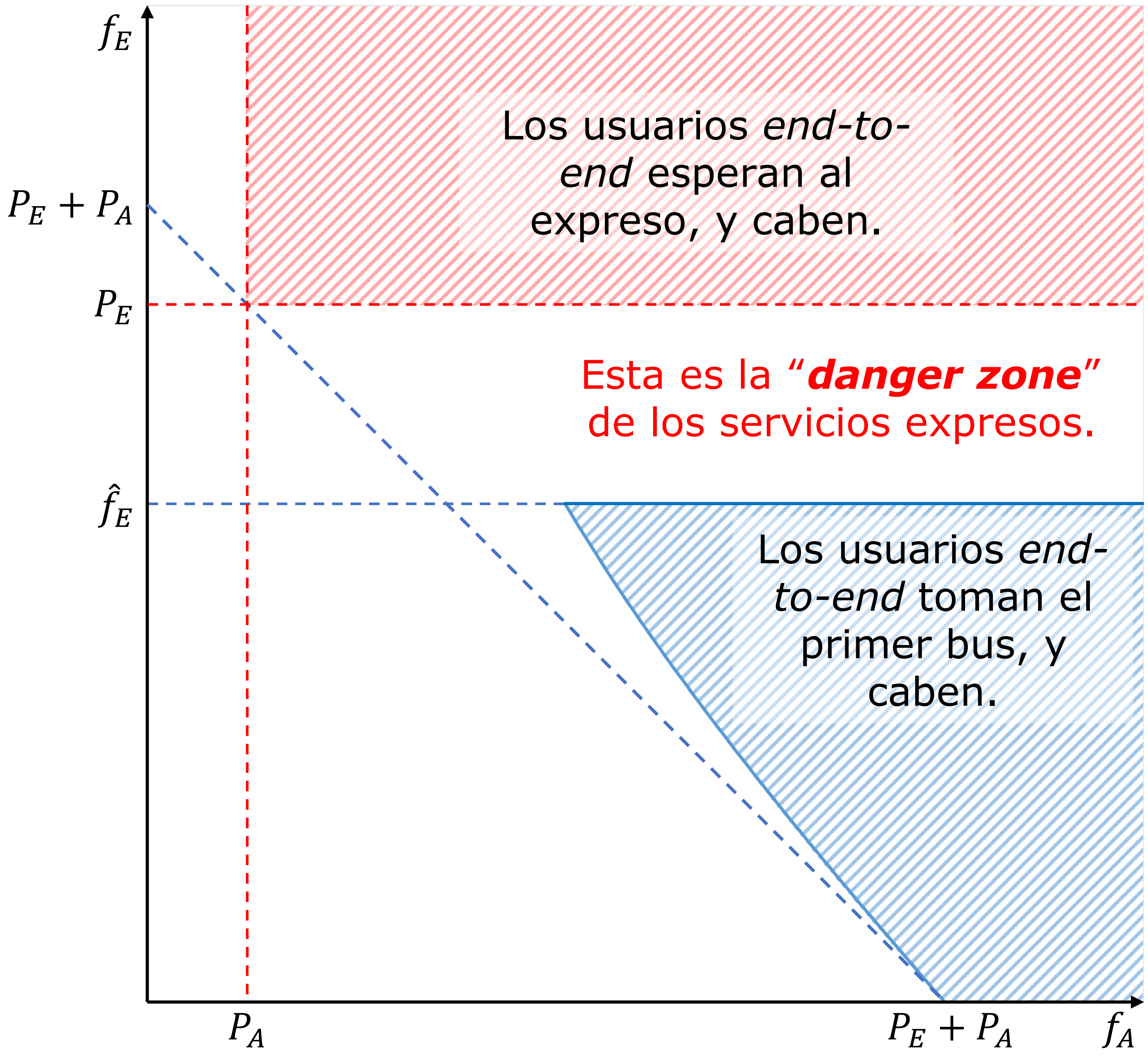

f_E
$P_E + P_A$
P_E
$\hat{f}_E$
Los usuarios *end-to-end* toman el primer bus, y caben.
P_A
$P_E + P_A$
f_A



f_E
$P_E + P_A$
P_E
$\hat{f}_E$
Los usuarios *end-to-end* esperan al expreso, y caben.
Los usuarios *end-to-end* toman el primer bus, y caben.
P_A
$P_E + P_A$
f_A



f_E
$P_E + P_A$
P_E
$\hat{f}_E$
Los usuarios *end-to-end* esperan al expreso, y caben.
Los usuarios *end-to-end* esperan al expreso, pero no tiene suficiente capacidad!
Los usuarios *end-to-end* toman el primer bus, y caben.
P_A
$P_E + P_A$
f_A

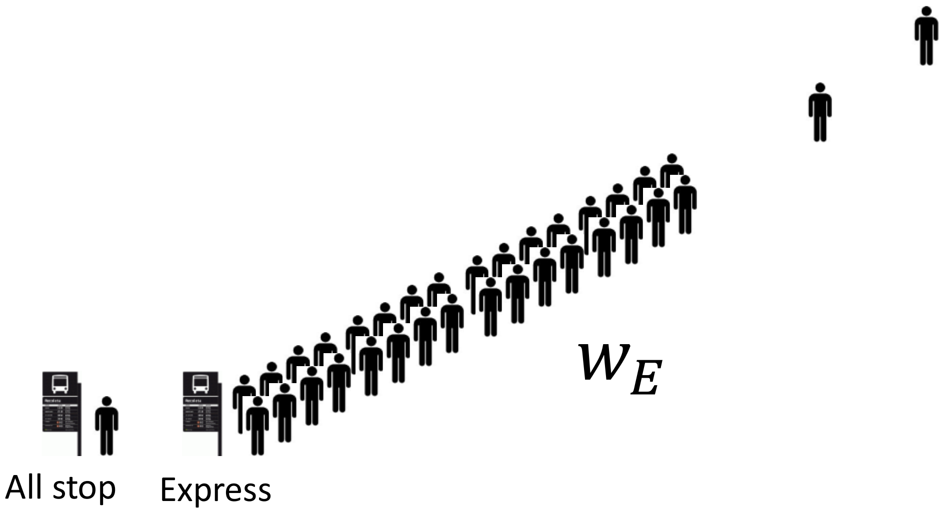

f_E
$P_E + P_A$
P_E
$\hat{f}_E$
P_A
$P_E + P_A$
f_A
Los usuarios *end-to-end* esperan al expreso, y caben.
Esta es la "***danger zone***" de los servicios expresos.
Los usuarios *end-to-end* toman el primer bus, y caben.

Parte 3

EN LA DANGER ZONE

En la *danger zone*, la demanda del expreso supera su tasa de servicio.

Esto genera la formación de una fila para el expreso. Los usuarios del expreso deberán esperar en fila un tiempo w_E hasta lograr abordar un bus.



Cuánto tiempo estaría dispuesto un usuario end-to-end a esperar en la fila?

$$w_E + t_E = \frac{0.5}{f_A} + t_A$$

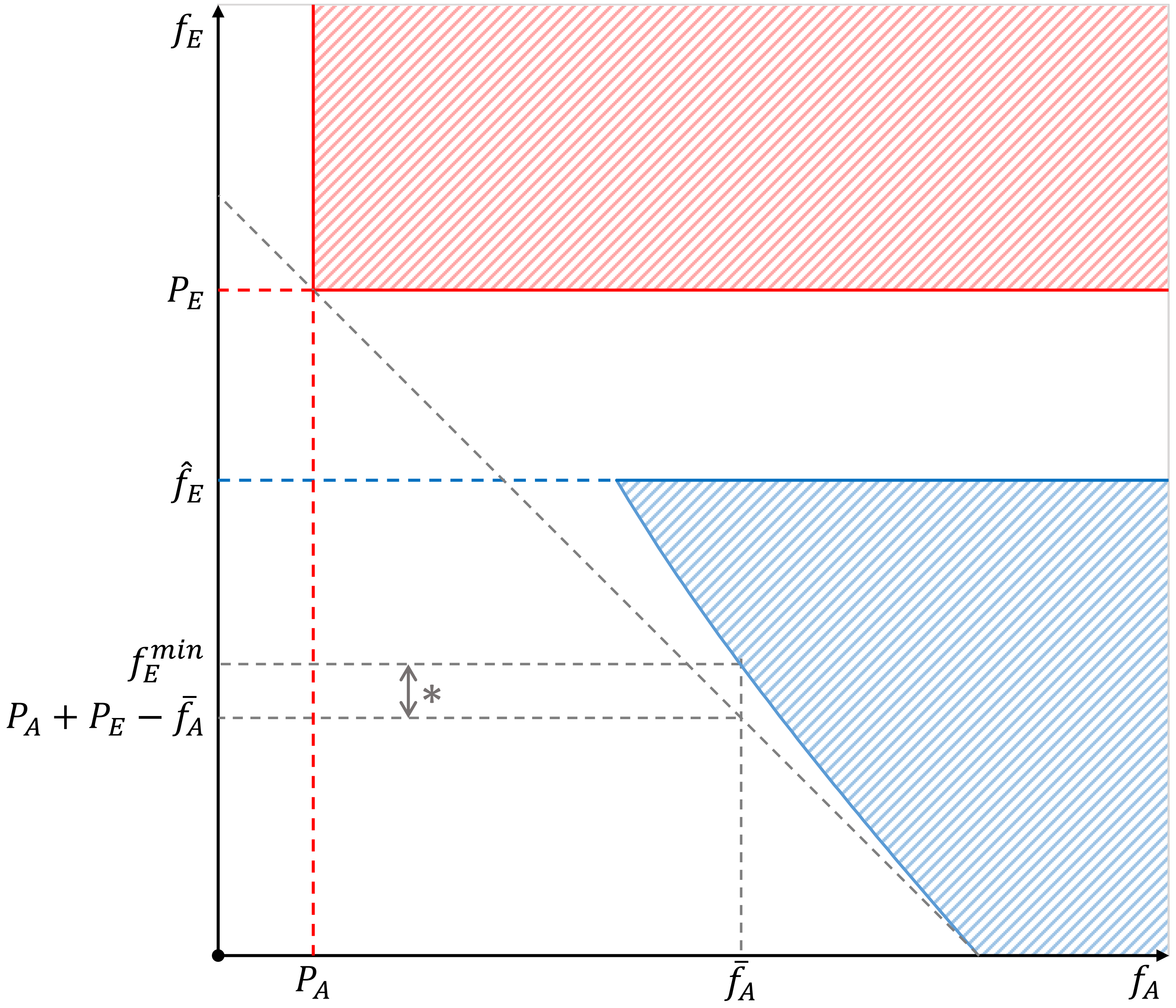
$$\Rightarrow \widehat{w}_E = \tau + \frac{0.5}{f_A}$$

Cuánto tiempo estaría dispuesto un usuario end-to-end a esperar en la fila?

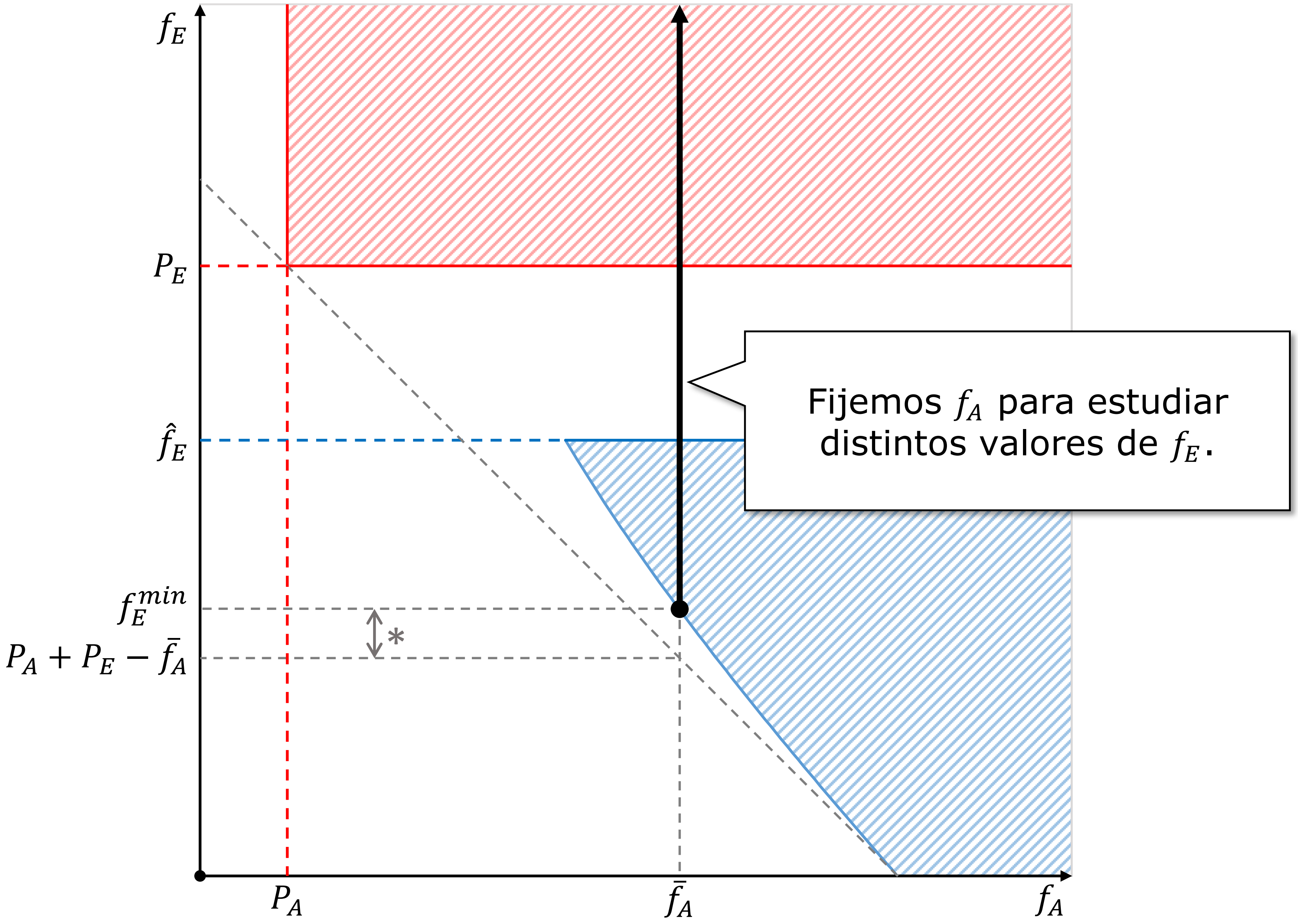
$$w_E + t_E = \frac{0.5}{f_A} + t_A$$

$$\Rightarrow \widehat{w}_E = \tau + \frac{0.5}{f_A}$$

Este valor es independiente de f_E!

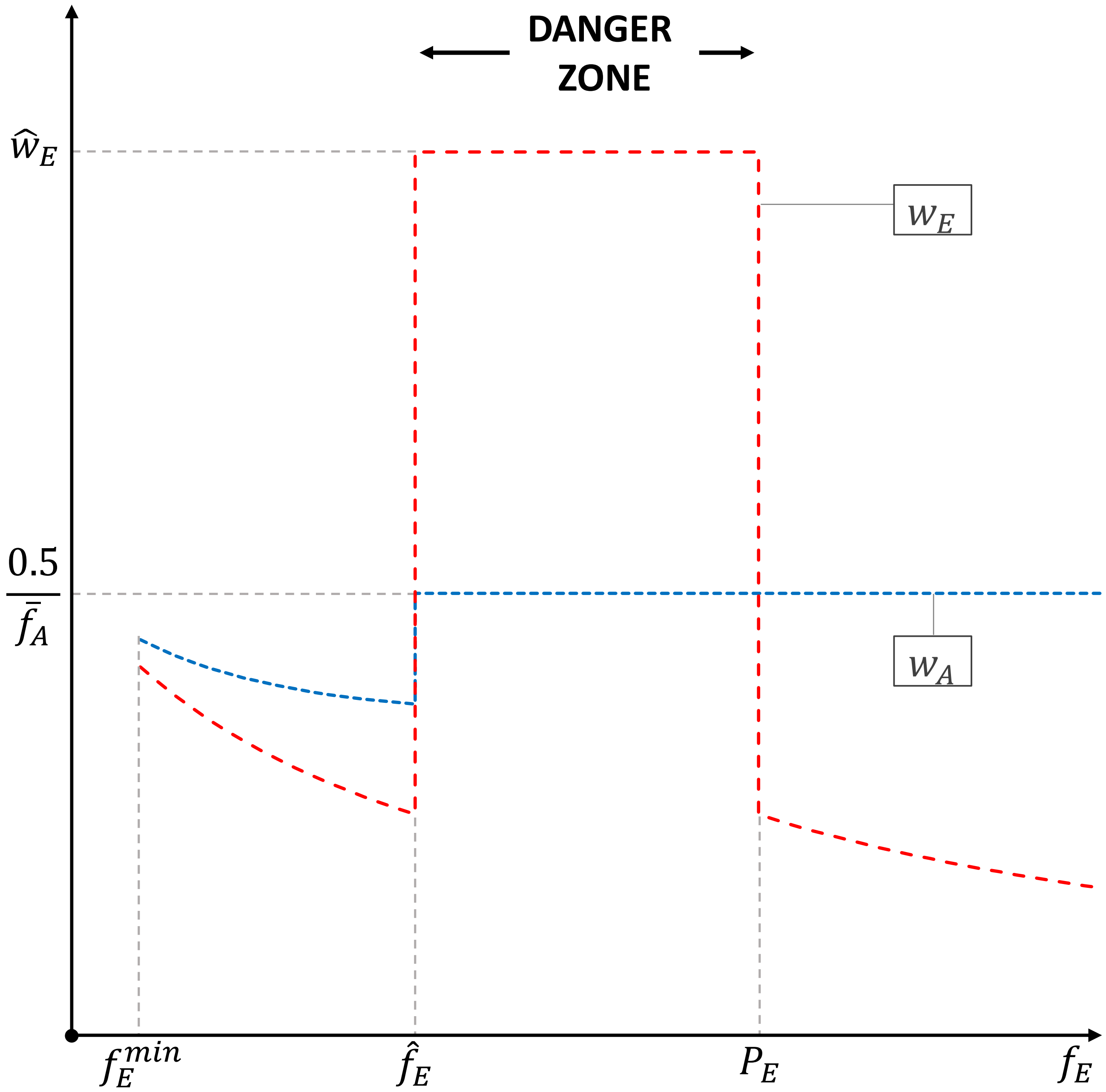


f_E
P_E
$\hat{f}_E$
f_E^{min}
$P_A + P_E - \bar{f}_A$
*
P_A
$\bar{f}_A$
f_A



f_E
P_E
$\hat{f}_E$
f_E^{min}
$P_A + P_E - \bar{f}_A$
*
P_A
$\bar{f}_A$
f_A
Fijemos f_A para estudiar distintos valores de f_E.

Tiempo promedio de espera



Parte 4

BUSCANDO LA DANGER ZONE

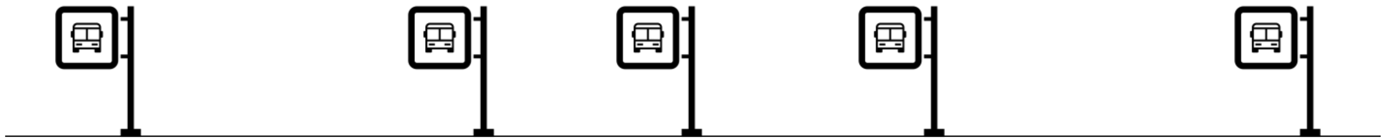
Con la ayuda de supuestos, encontramos matemáticamente la "*danger zone*". ¿Qué pasa si relajamos estos supuestos? ¿Cómo podemos estudiar la "*danger zone*"?

Con la ayuda de supuestos, encontramos matemáticamente la “*danger zone*”. ¿Qué pasa si relajamos estos supuestos? ¿Cómo podemos estudiar la “*danger zone*”?

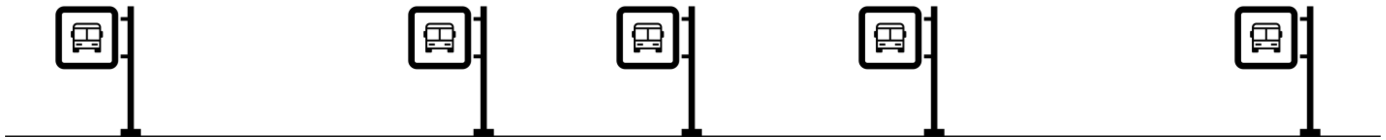
Vamos a simular un corredor BRT, para poder estudiarla.

LOS DATOS

Paradas del corredor



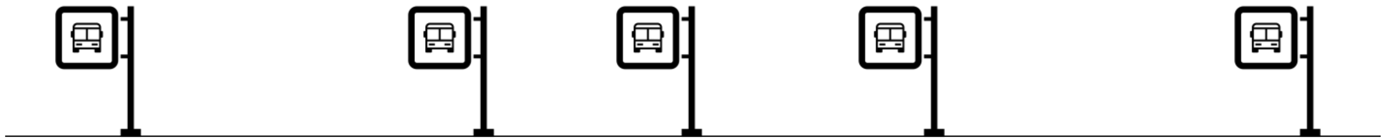
Paradas del corredor



Matriz de demanda

$\frac{Oi}{Dj}$	1	2
1		
2		

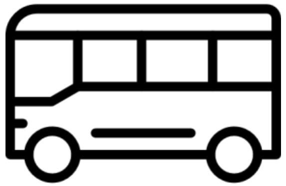
Paradas del corredor



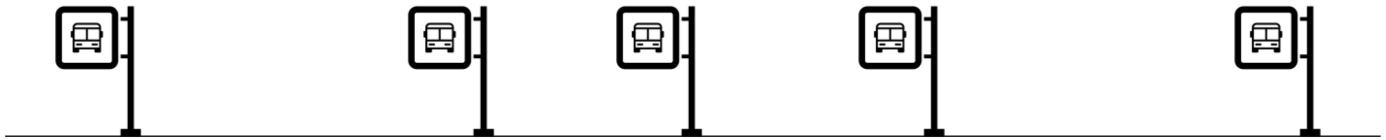
Matriz de demanda

$\frac{Oi}{Dj}$	1	2
1		
2		

Capacidad de los buses



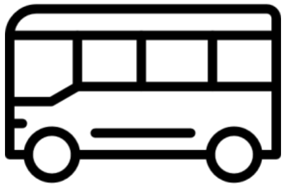
Paradas del corredor



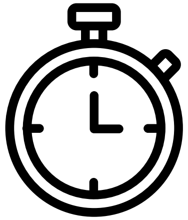
Matriz de demanda

$\frac{Oi}{Dj}$	1	2
1		
2		

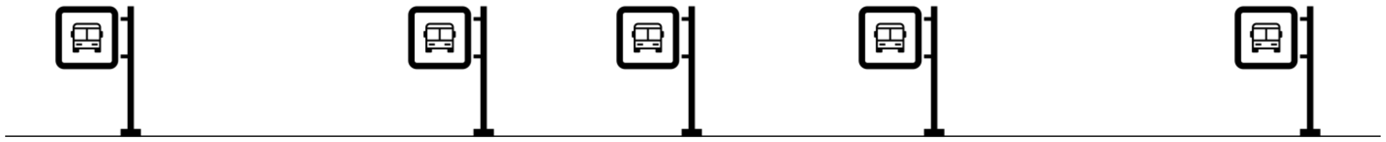
Capacidad de los buses



Horizonte de simulación



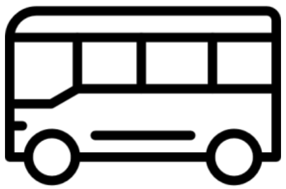
Paradas del corredor



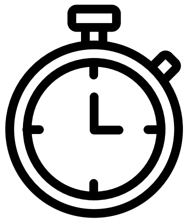
Matriz de demanda

$\frac{Oi}{Dj}$	1	2
1		
2		

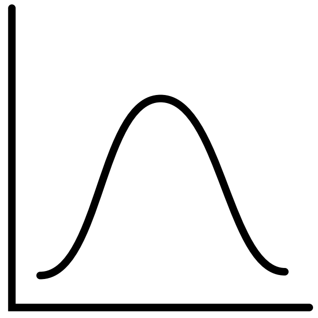
Capacidad de los buses



Horizonte de simulación



Distribuciones de llegada de buses y personas



EL MECANISMO INTERNO

SUPUESTO 1: la frecuencia del servicio *all-stop* es suficientemente alta para que no se formen colas.

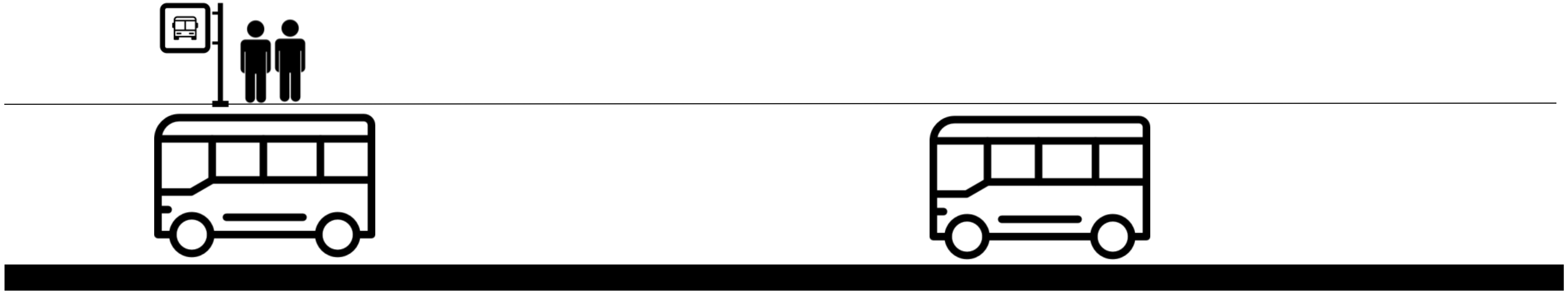
SUPUESTO 1: la frecuencia del servicio *all-stop* es suficientemente alta para que no se formen colas.

De no ser así, se forman colas en todo el sistema (divergencia).

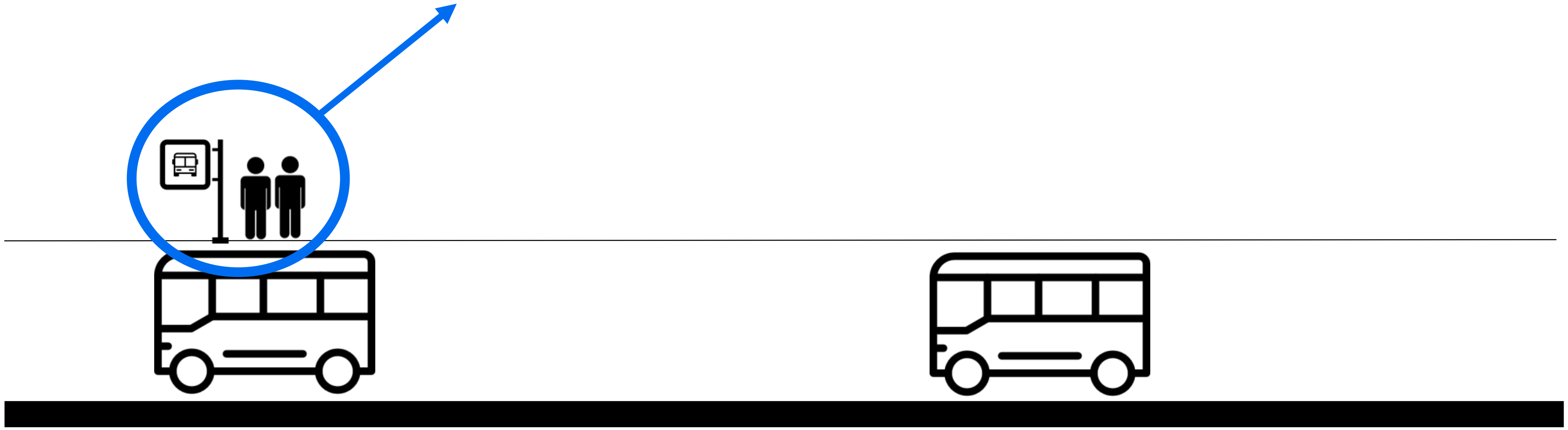
SUPUESTO 2: las personas conocen las frecuencias de los buses, pero no la hora de llegada exacta del siguiente bus.

SUPUESTO 2: las personas conocen las frecuencias de los buses, pero no la hora de llegada exacta del siguiente bus.

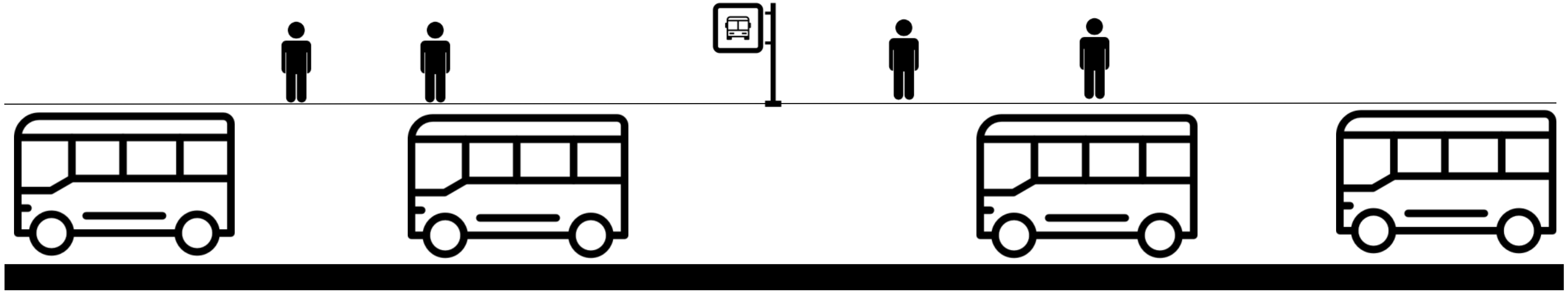
Si la conocieran, la decisión se procesaría de diferente manera.



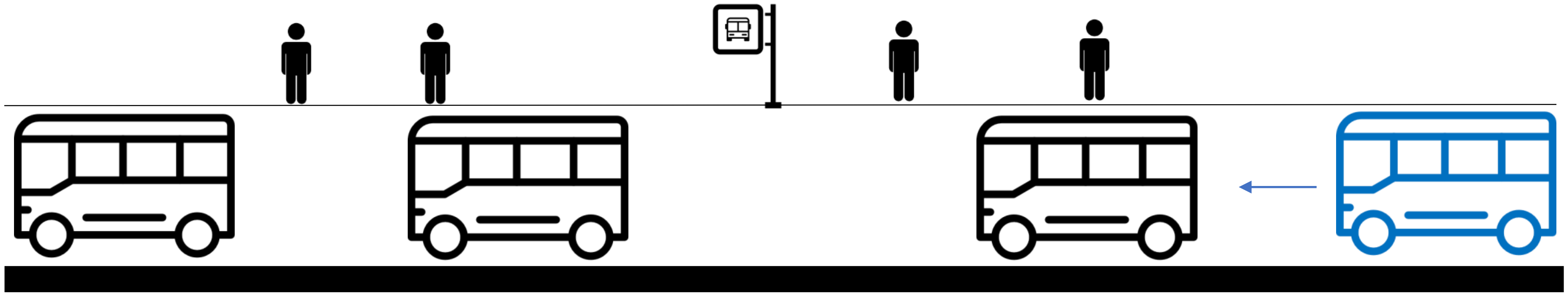
¿Qué pasa en cada paradero?



Recordemos los elementos que teníamos:

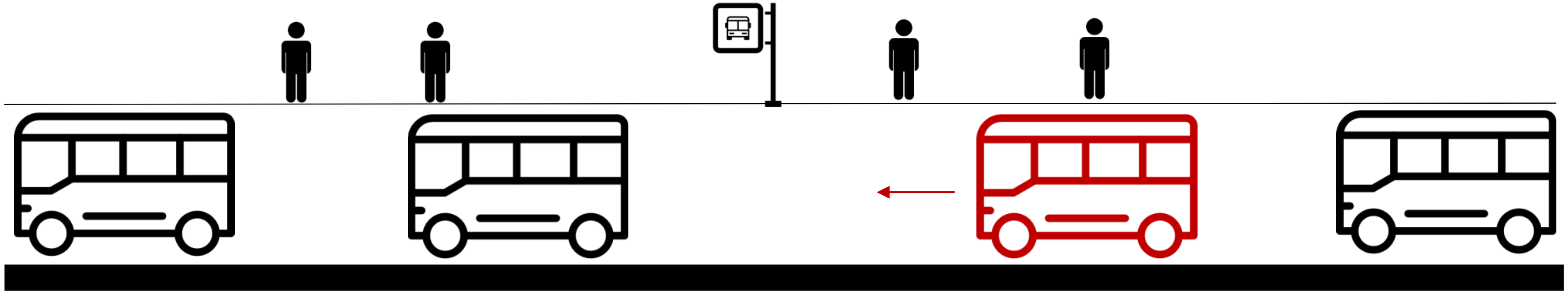


Recordemos los elementos que teníamos:



Llegan buses all-stop

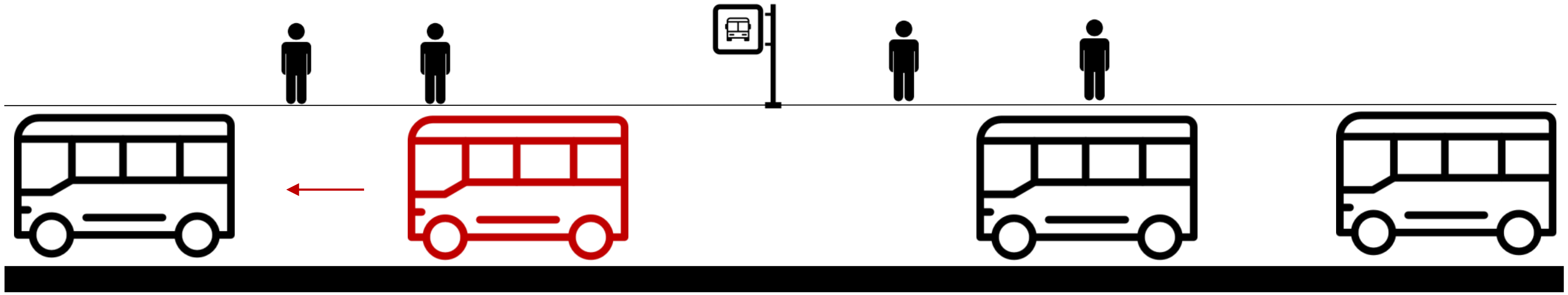
Recordemos los elementos que teníamos:



Llegan buses all-stop

Llegan buses expresos

Recordemos los elementos que teníamos:

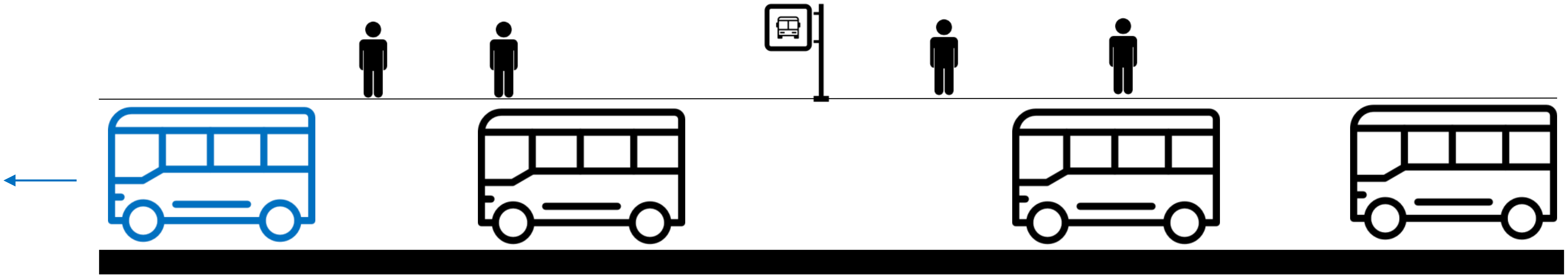


Llegan buses all-stop

Llegan buses expresos

Se van buses expresos

Recordemos los elementos que teníamos:



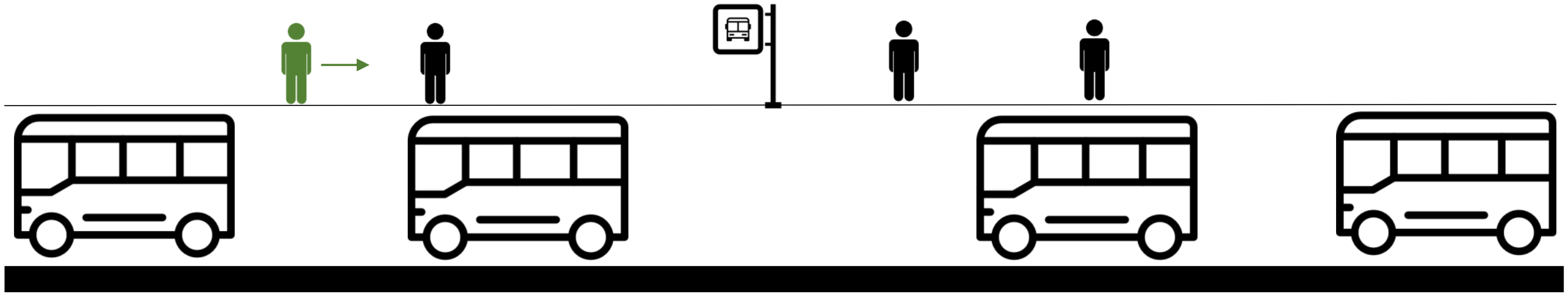
Llegan buses all-stop

Llegan buses expresos

Se van buses expresos

Se van buses all-stop

Recordemos los elementos que teníamos:



Llegan buses all-stop

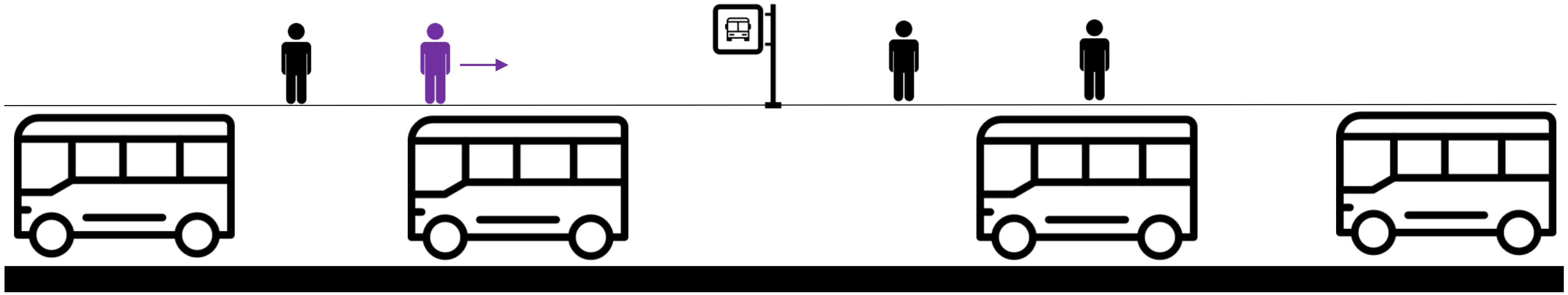
Llegan buses expresos

Se van buses expresos

Se van buses all-stop

Entran usuarios cautivos

Recordemos los elementos que teníamos:



Llegan buses all-stop

Llegan buses expresos

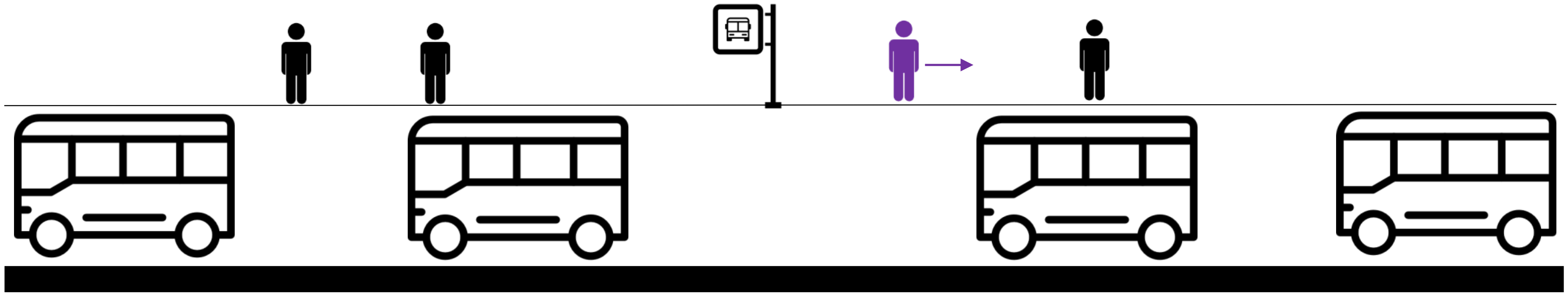
Se van buses expresos

Se van buses all-stop

Entran usuarios cautivos

Entran usuarios flexibles

Recordemos los elementos que teníamos:



Llegan buses all-stop

Llegan buses expresos

Se van buses expresos

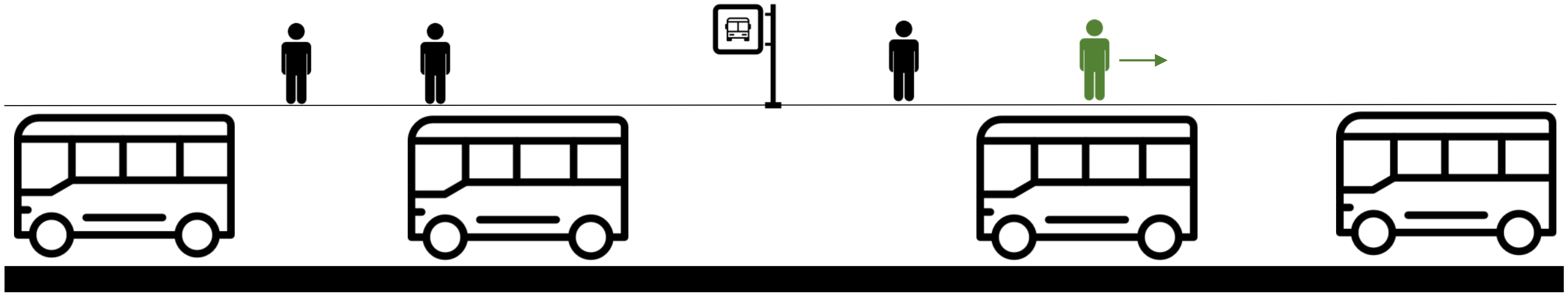
Se van buses all-stop

Entran usuarios cautivos

Entran usuarios flexibles

Salen usuarios flexibles

Recordemos los elementos que teníamos:



Llegan buses all-stop

Llegan buses expresos

Se van buses expresos

Se van buses all-stop

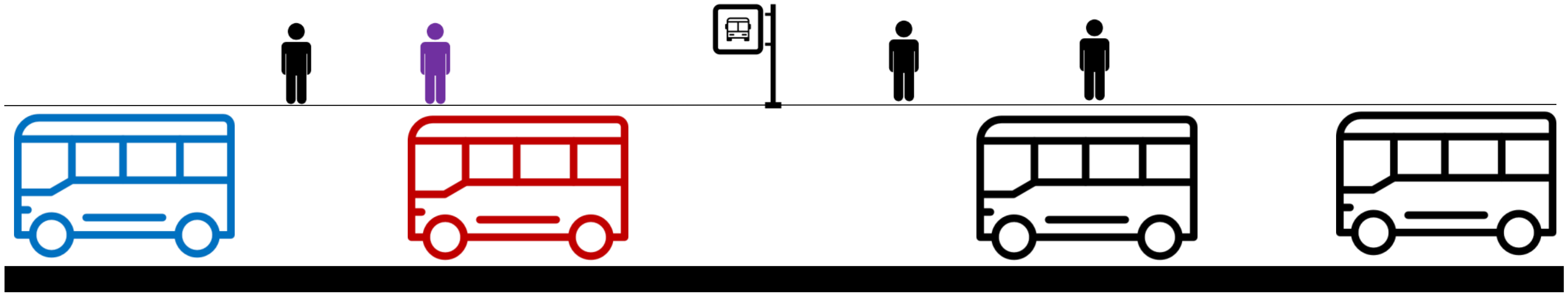
Entran usuarios cautivos

Entran usuarios flexibles

Salen usuarios flexibles

Salen usuarios cautivos

Los elementos problemáticos:



Llegan buses all-stop

Llegan buses expresos

Se van buses expresos

Se van buses all-stop

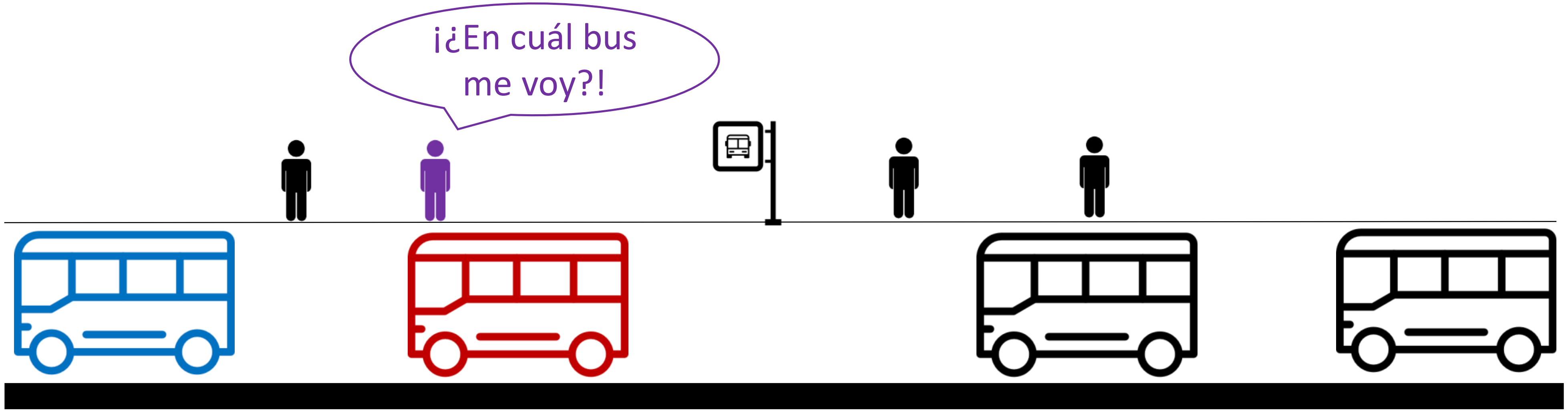
Entran usuarios cautivos

Entran usuarios flexibles

Salen usuarios flexibles

Salen usuarios cautivos

Los elementos problemáticos:



Llegan buses all-stop

Llegan buses expresos

Se van buses expresos

Se van buses all-stop

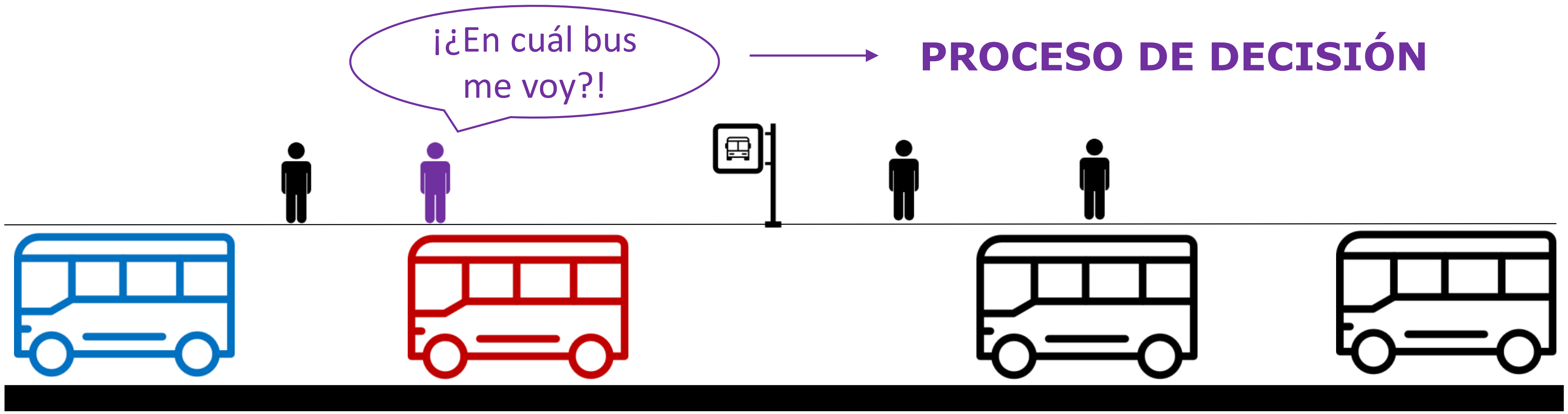
Entran usuarios cautivos

Entran usuarios flexibles

Salen usuarios flexibles

Salen usuarios cautivos

Los elementos problemáticos:



Llegan buses all-stop

Llegan buses expresos

Se van buses expresos

Se van buses all-stop

Entran usuarios cautivos

Entran usuarios flexibles

Salen usuarios flexibles

Salen usuarios cautivos

1 Tomar el primer bus que pase.

2 Tomar un bus expreso

$$C_{\{A,E\}} = \frac{f_A * t_A + f_E * t_E + 0.5}{f_A + f_E}$$

$$C_{\{E\}} = t_E + \frac{0.5}{f_E}$$

1 Tomar el primer bus que pase.

2 Tomar un bus expreso

No hay cola efectiva, los usuarios esperan en el paradero sin orden aparente.

$$C_{\{A,E\}} = \frac{f_A * t_A + f_E * t_E + 0.5}{f_A + f_E}$$

1 Tomar el primer bus que pase.

Unirse a la cola del bus expreso, salvo que esta supere un largo crítico.

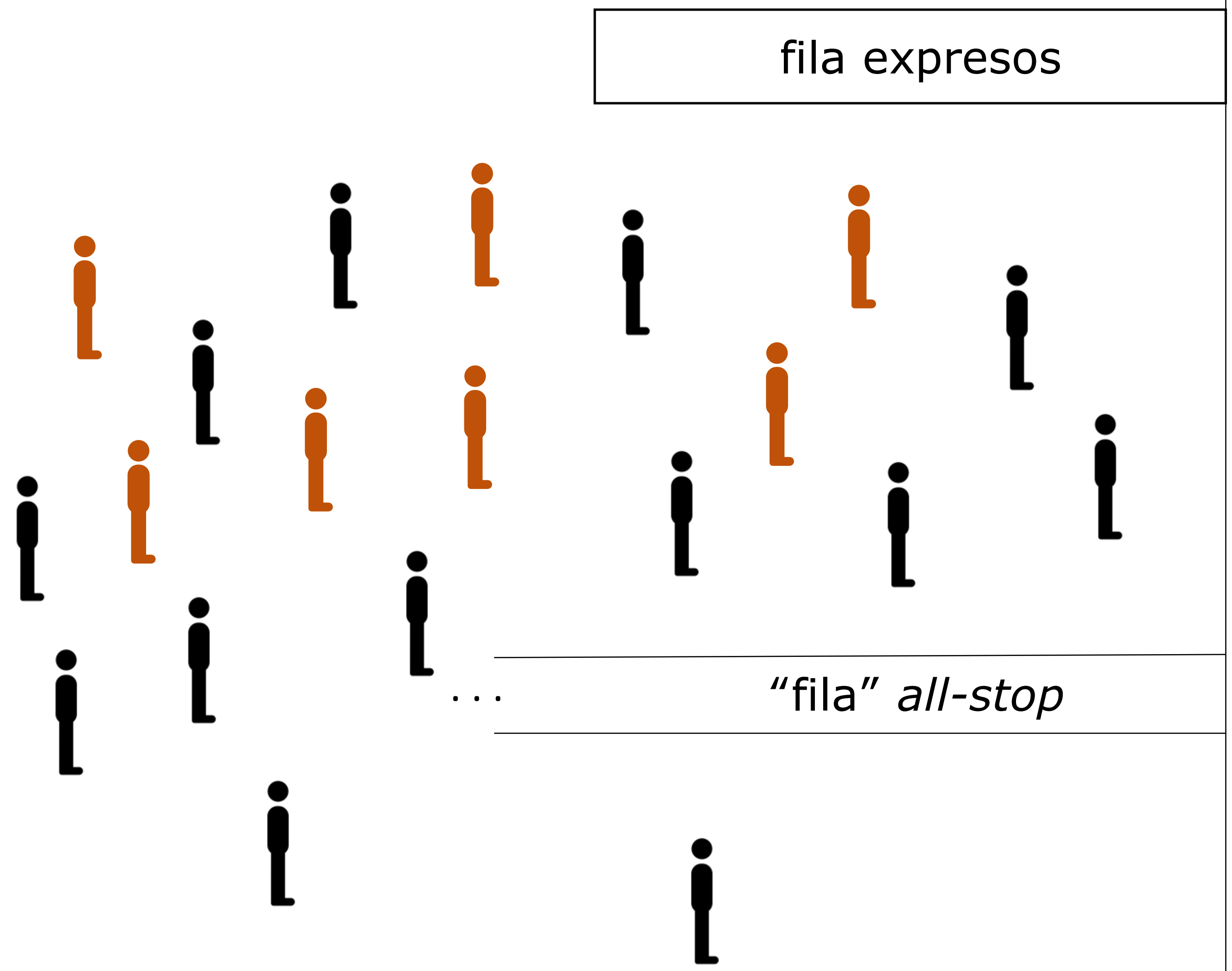
$$C_{\{E\}} = t_E + \frac{0.5}{f_E}$$

2 Tomar un bus expreso

Hay entonces cuatro situaciones:

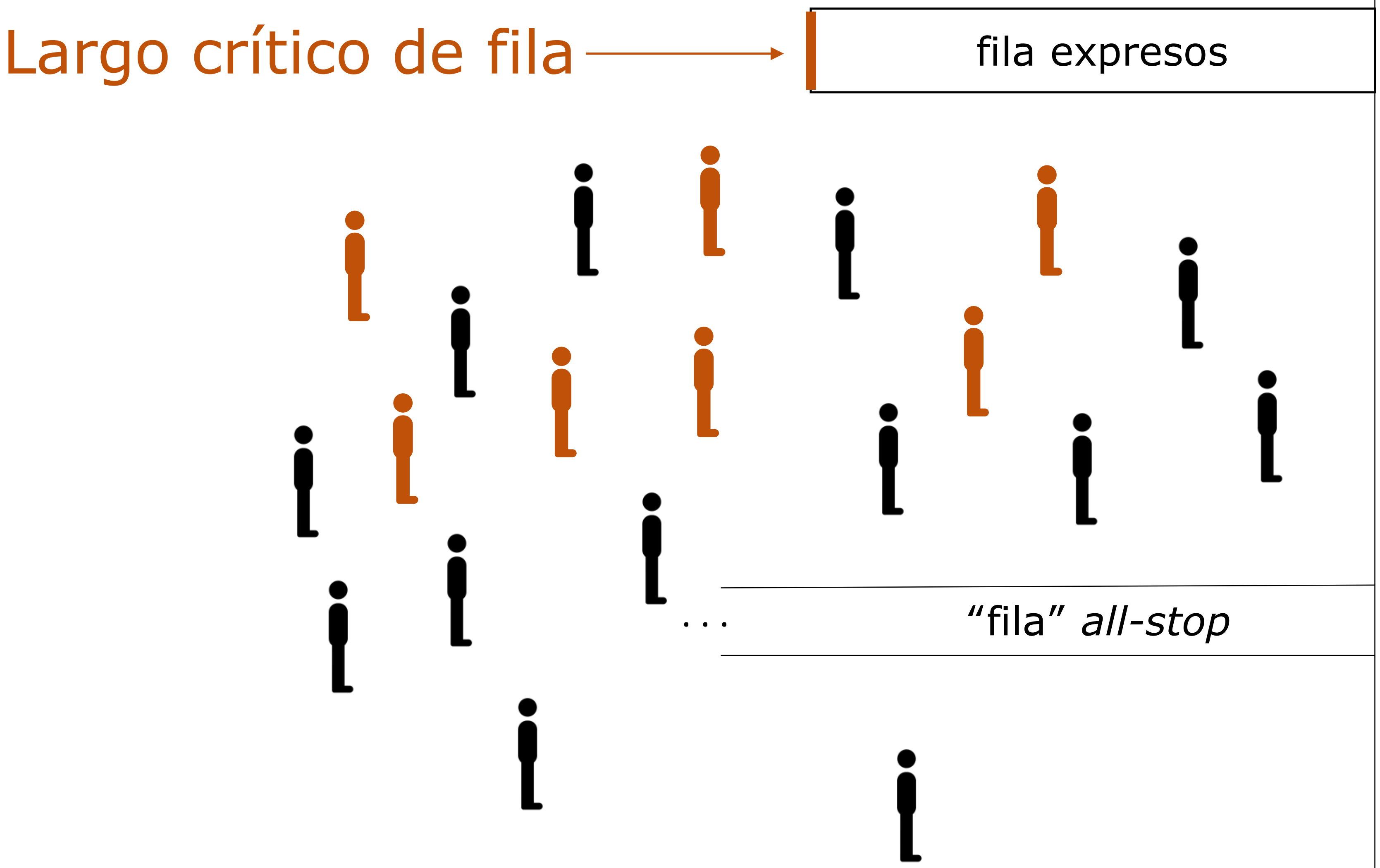
1.

$$f_E < \widehat{f}_E$$



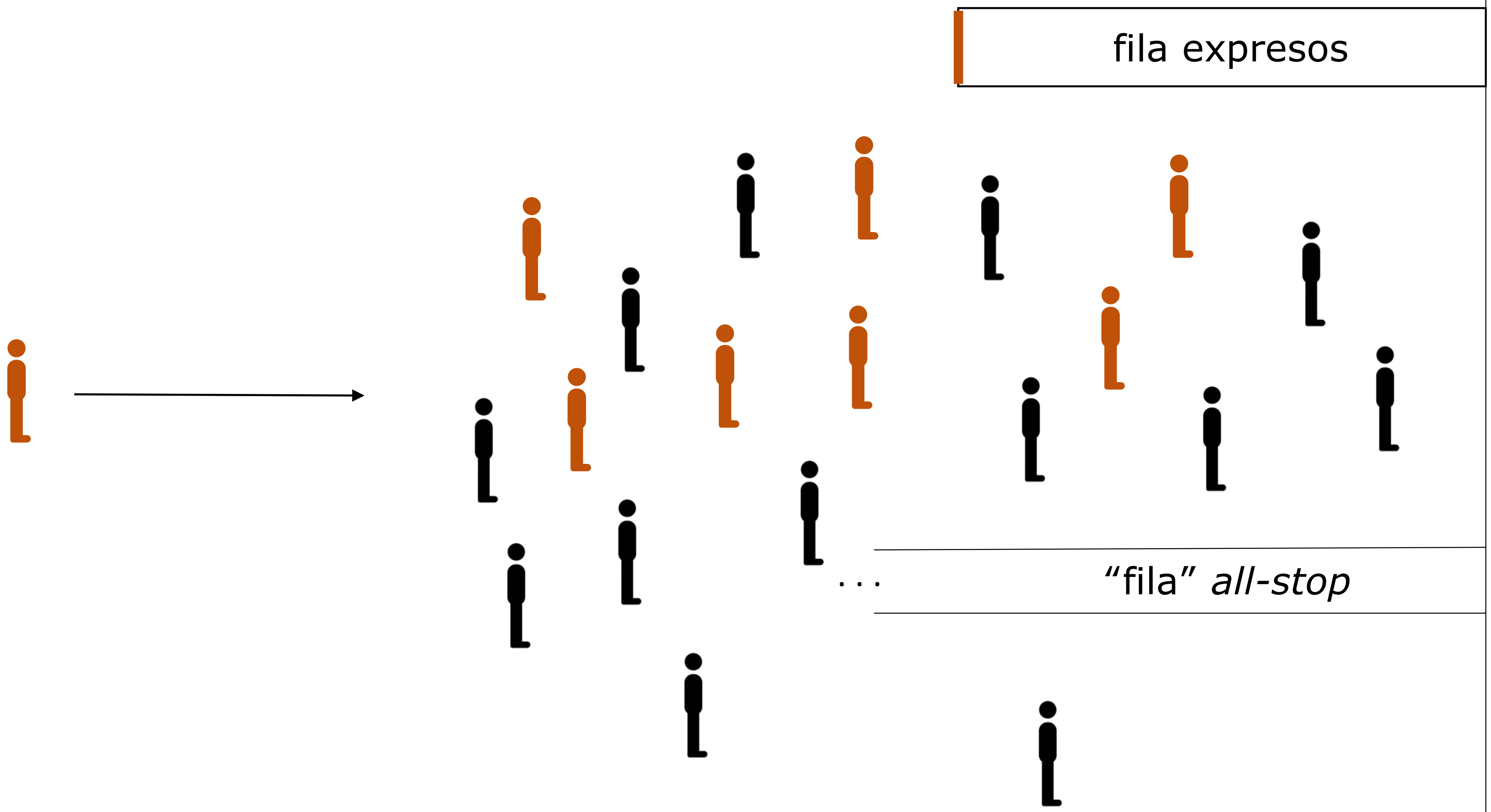
1.

$$f_E < \widehat{f_E}$$



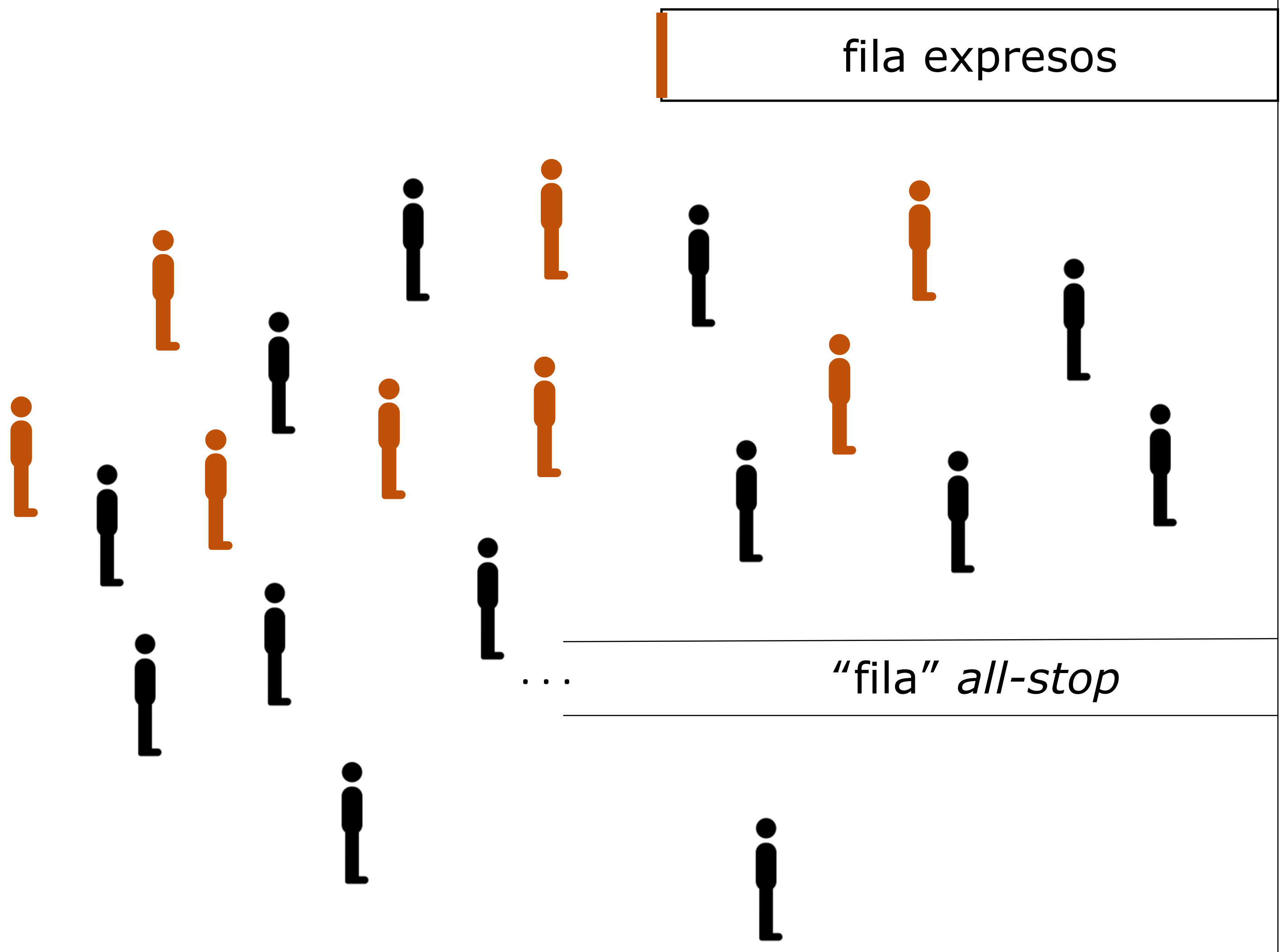
1.

$$f_E < \widehat{f_E}$$



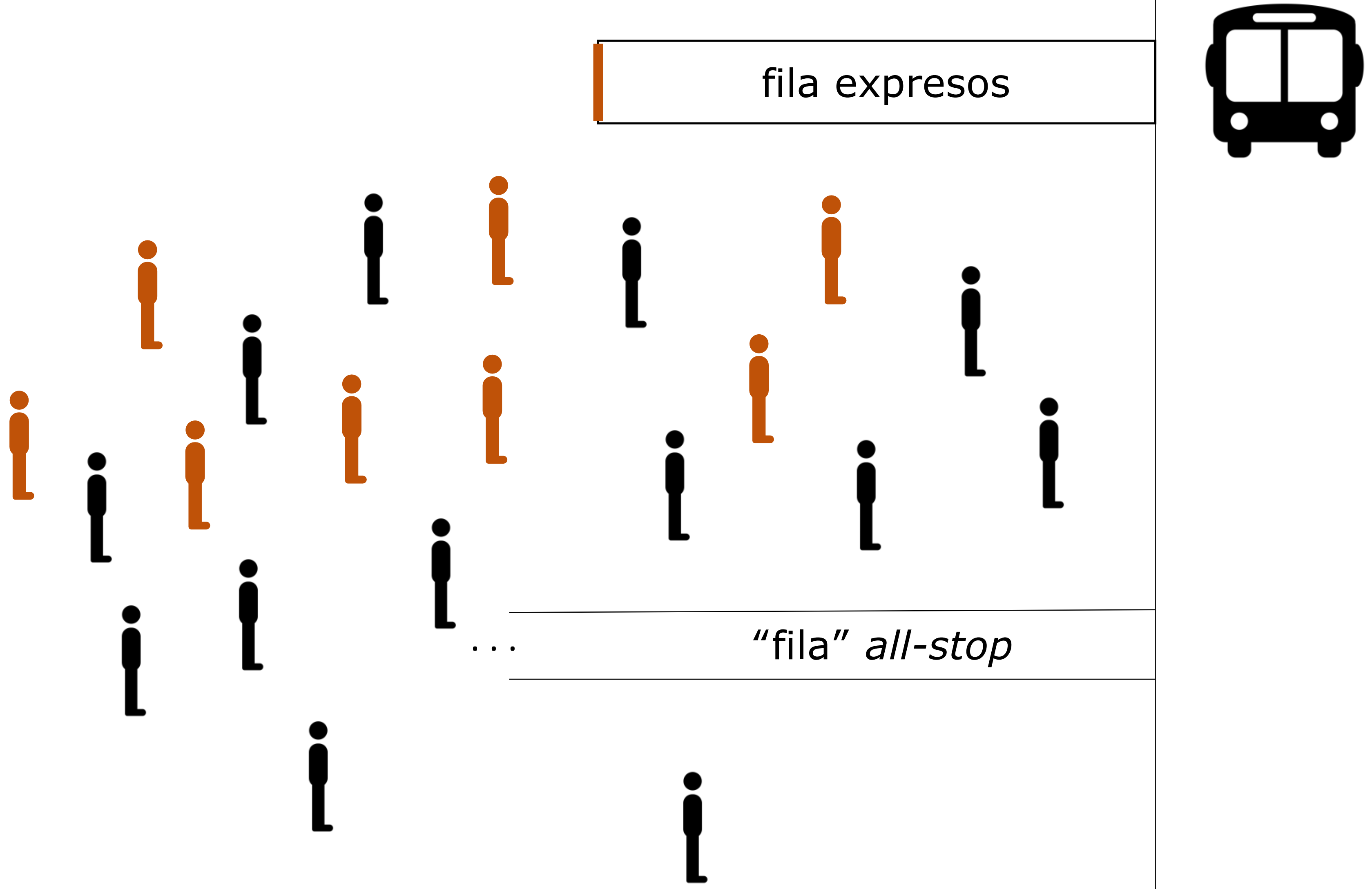
1.

$$f_E < \widehat{f}_E$$



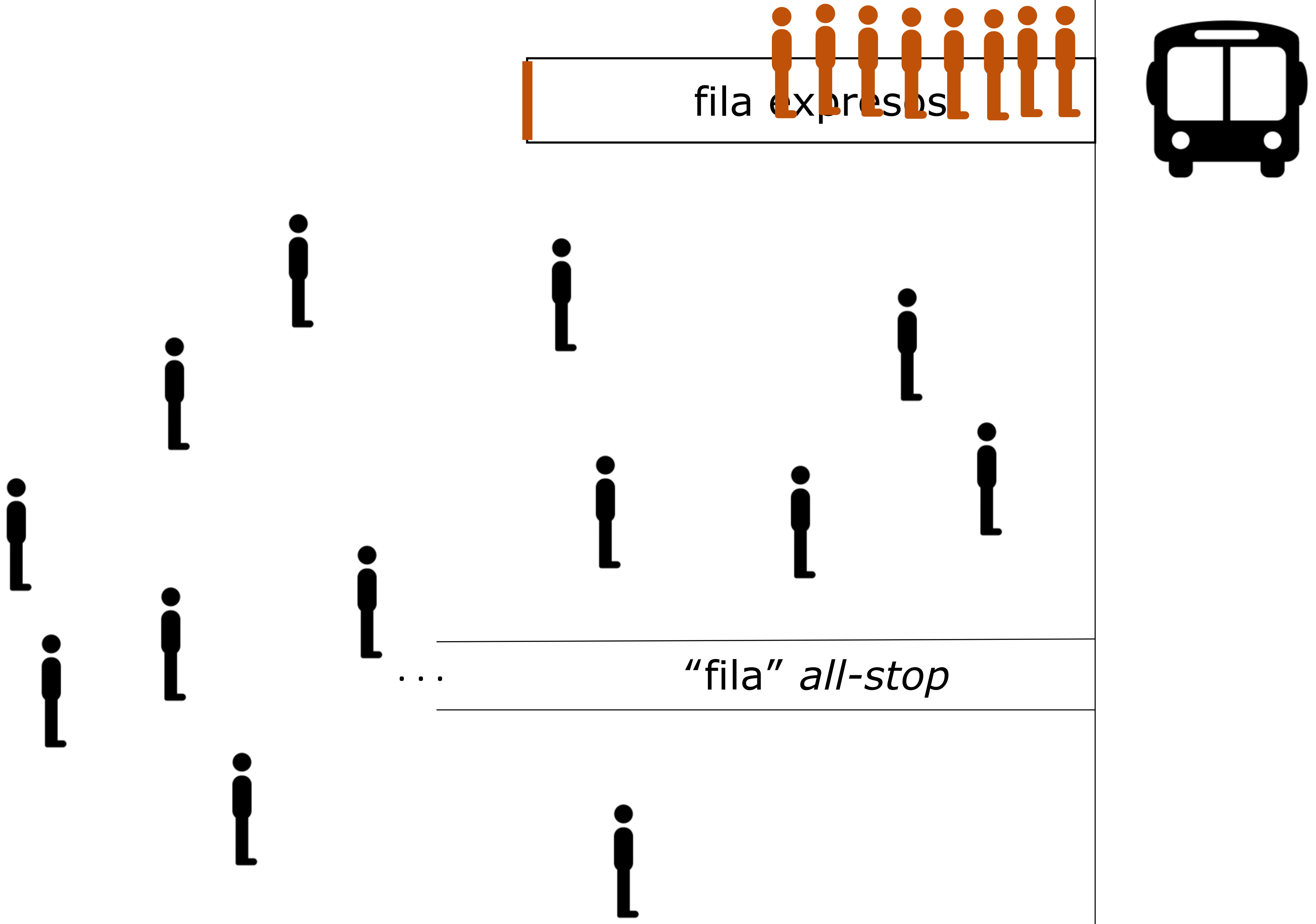
1a.

$$f_E < \widehat{f}_E$$



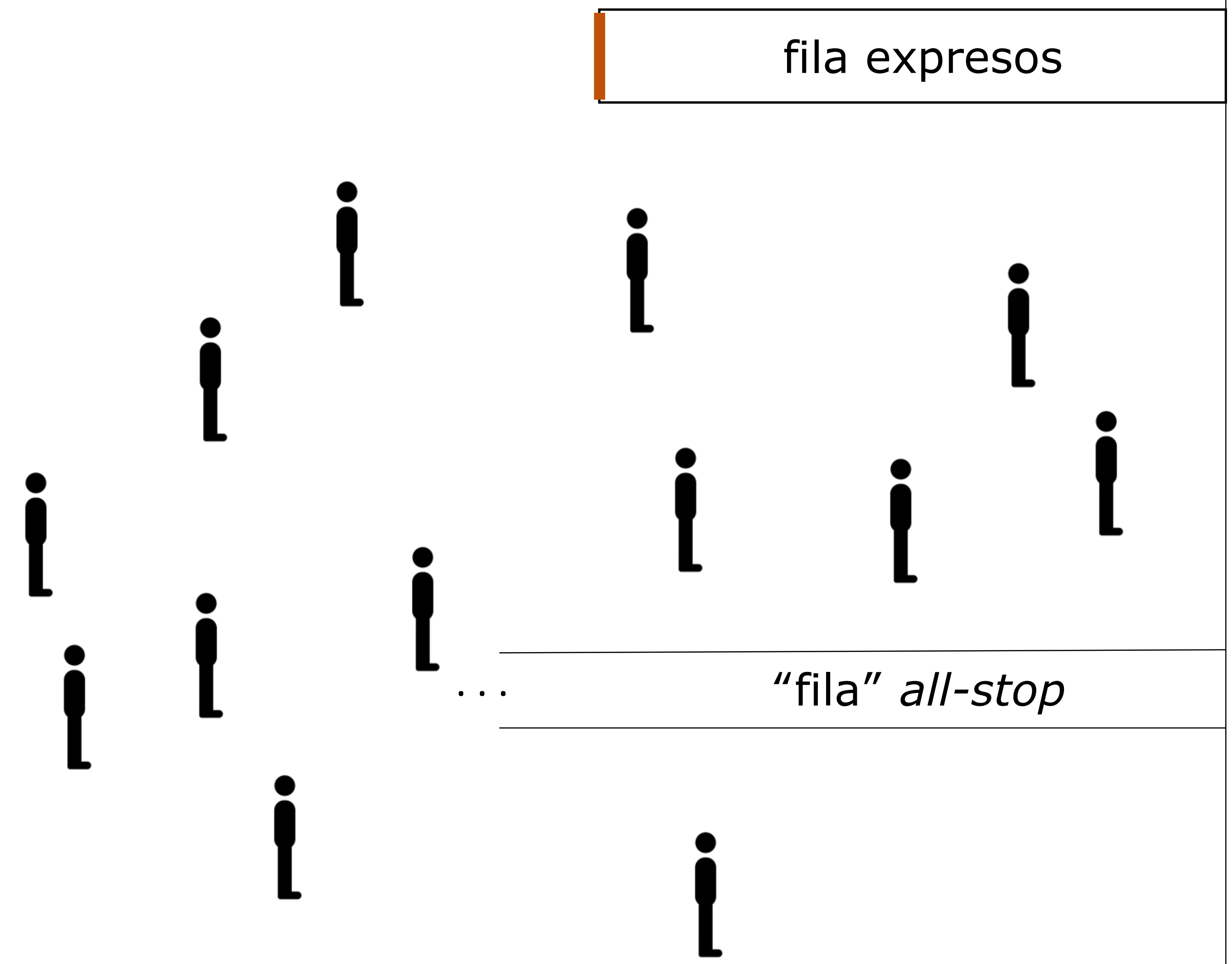
1a.

$$f_E < \widehat{f}_E$$



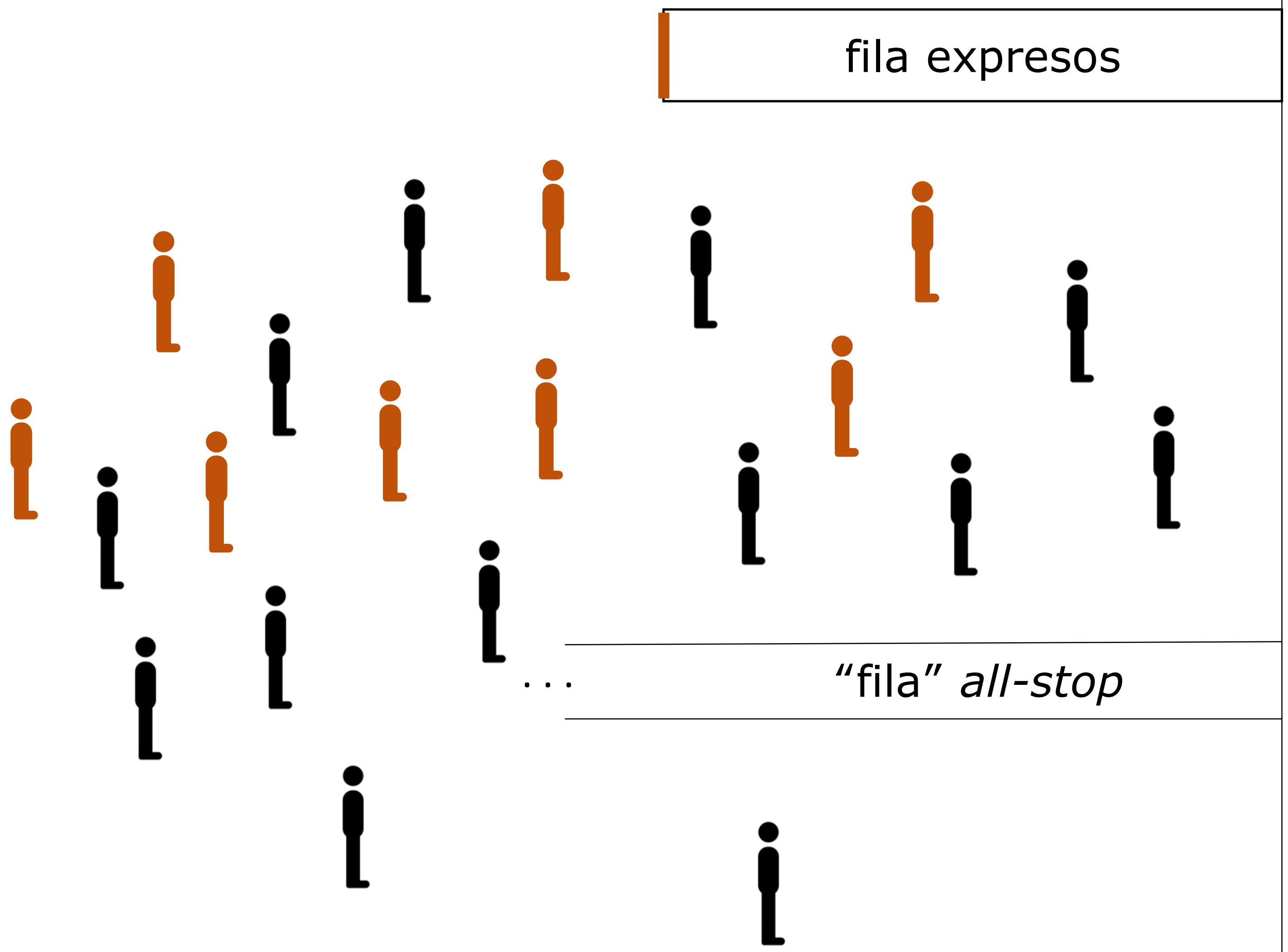
1a.

$$f_E < \widehat{f}_E$$



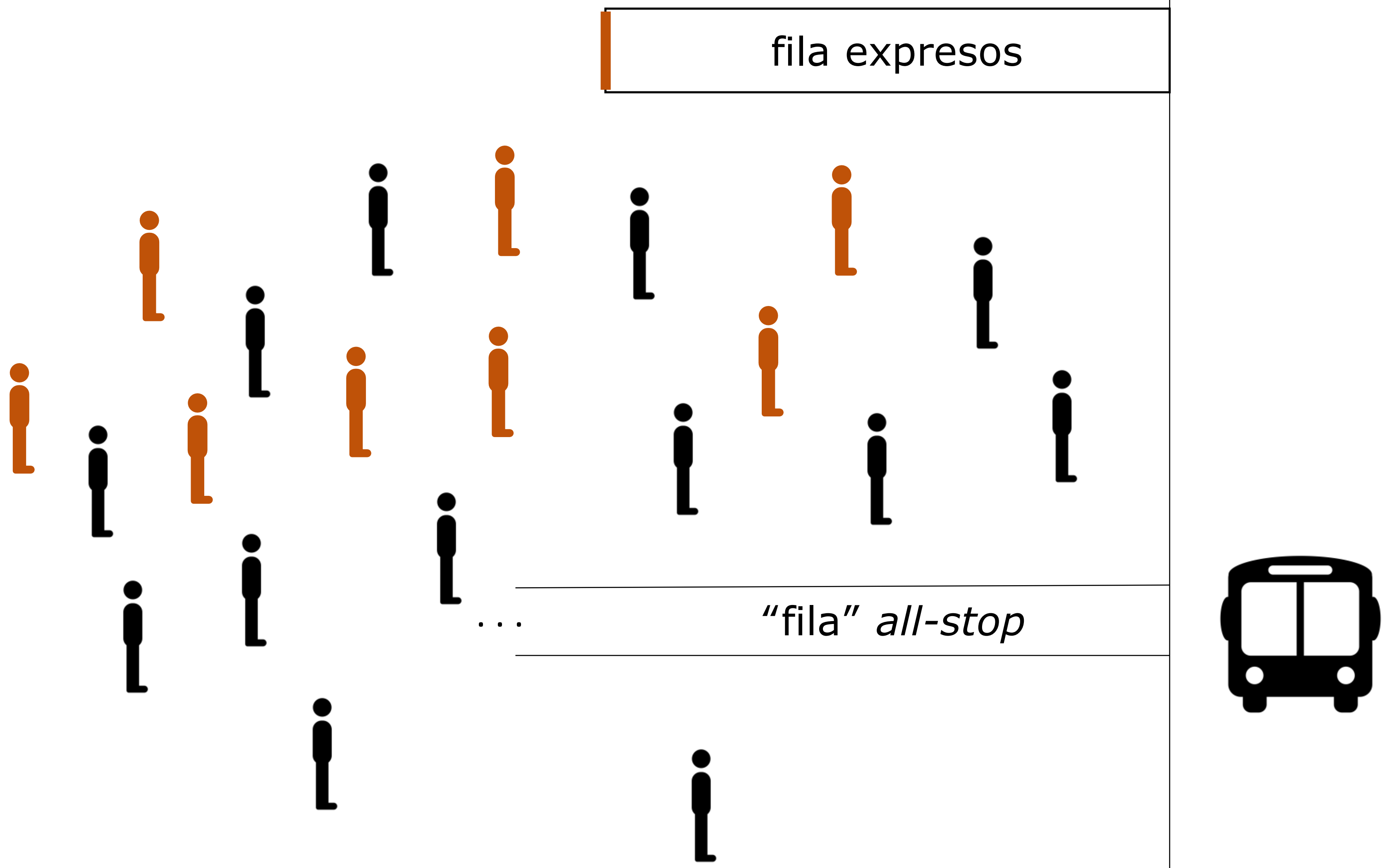
1b.

$$f_E < \widehat{f_E}$$



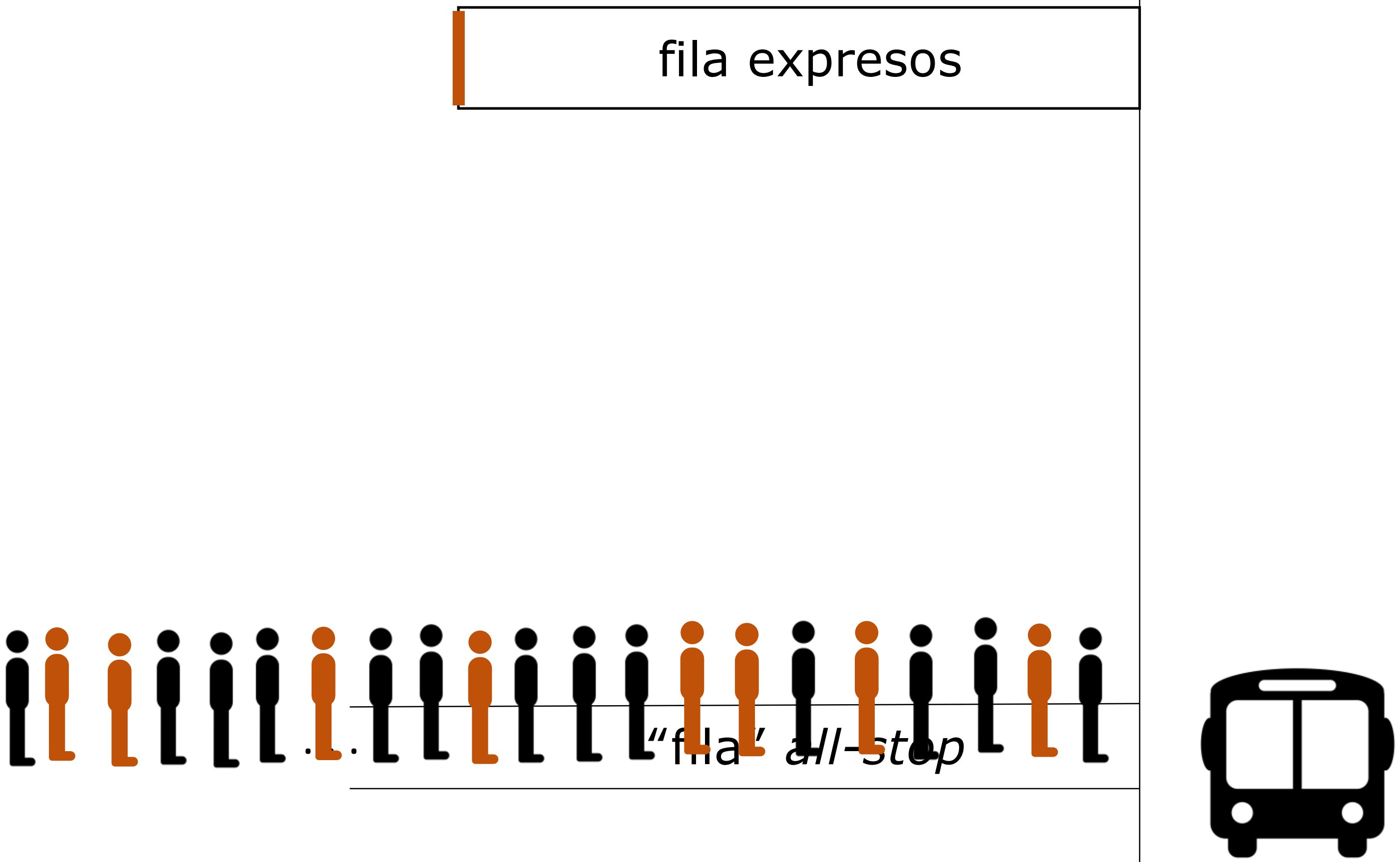
1b.

$$f_E < \widehat{f_E}$$



1b.

$$f_E < \widehat{f}_E$$



1b.

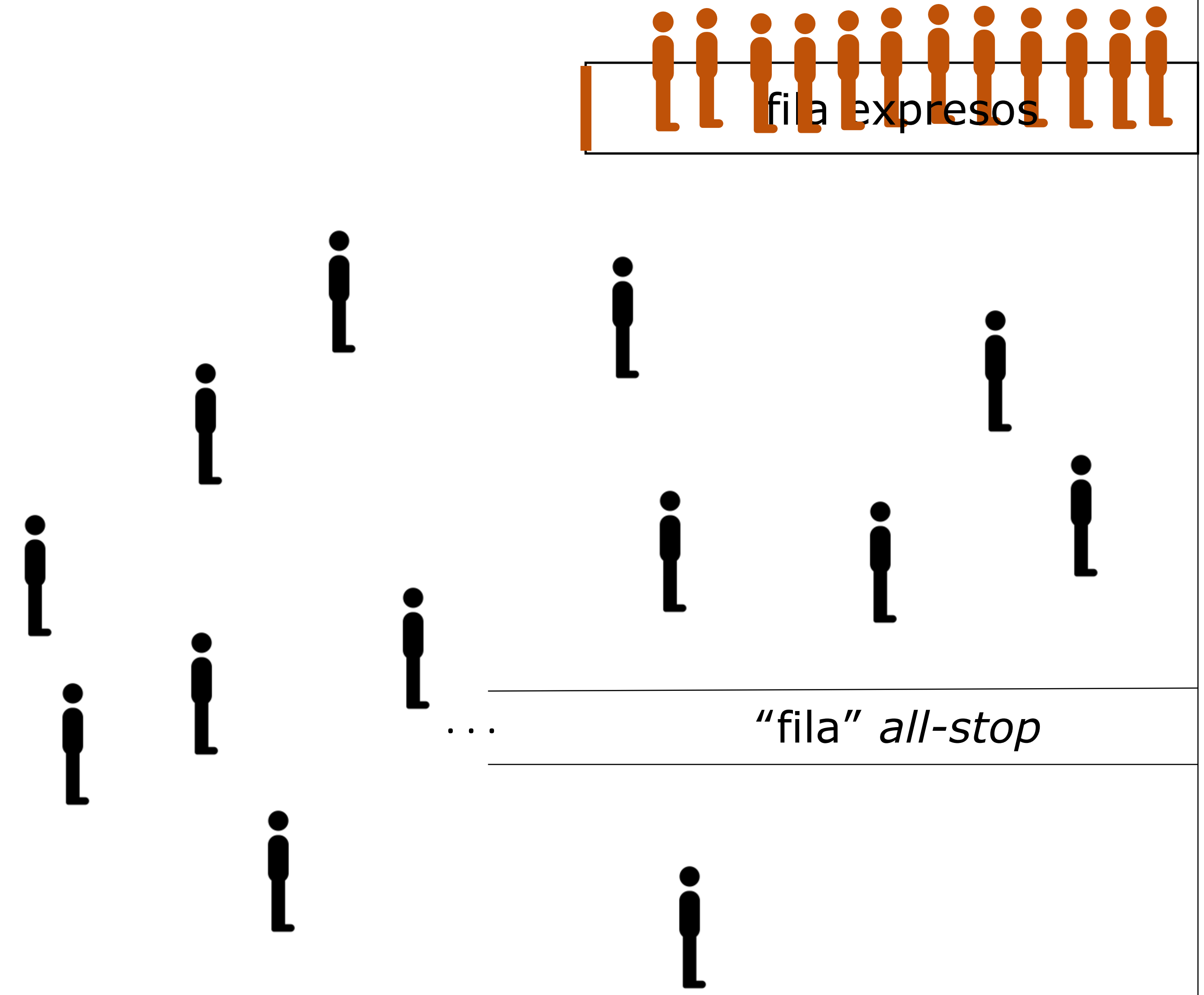
$$f_E < \widehat{f}_E$$

fila expresos

. . . “fila” *all-stop*

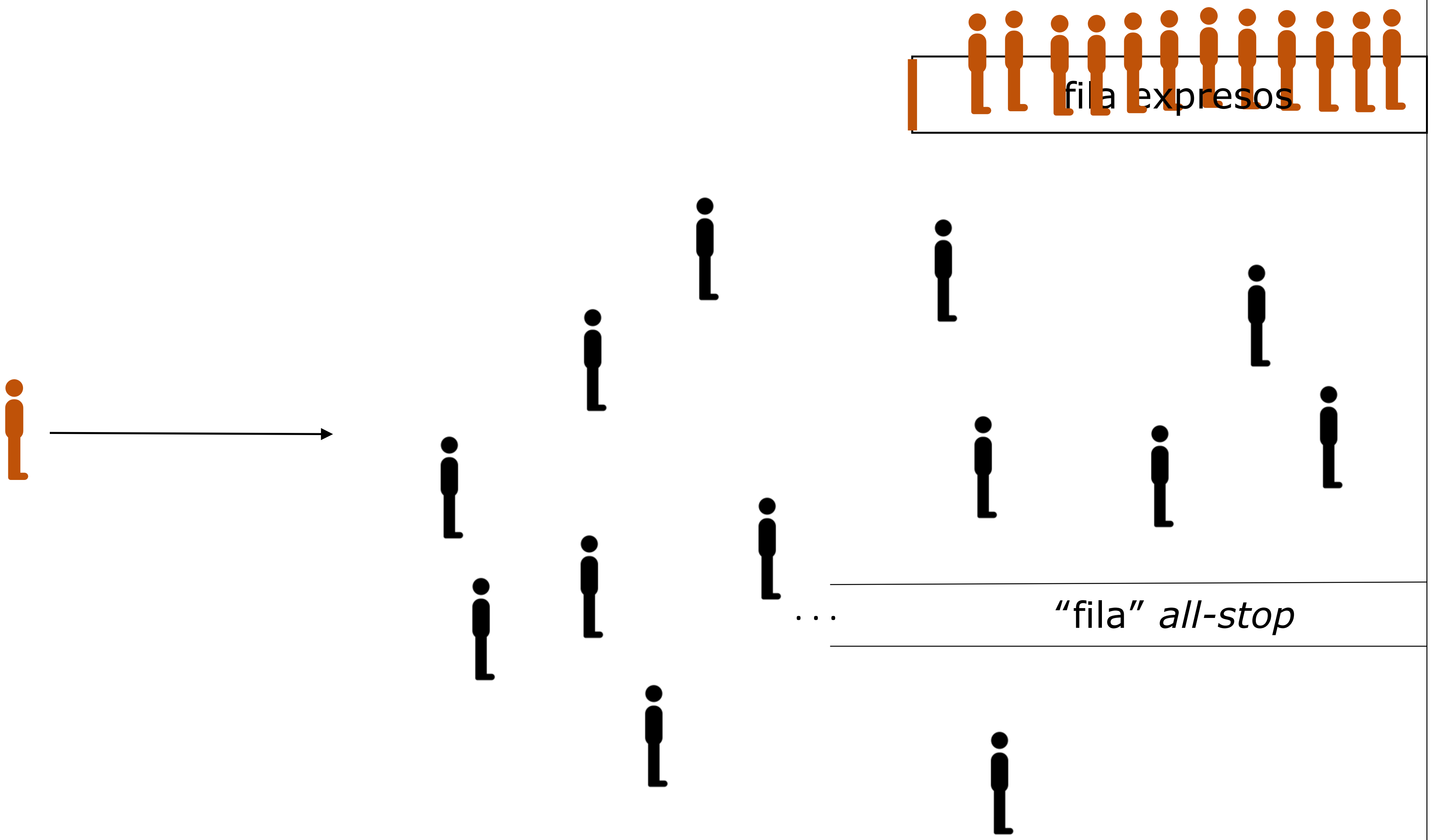
2.

$$f_E > \hat{f}_E$$



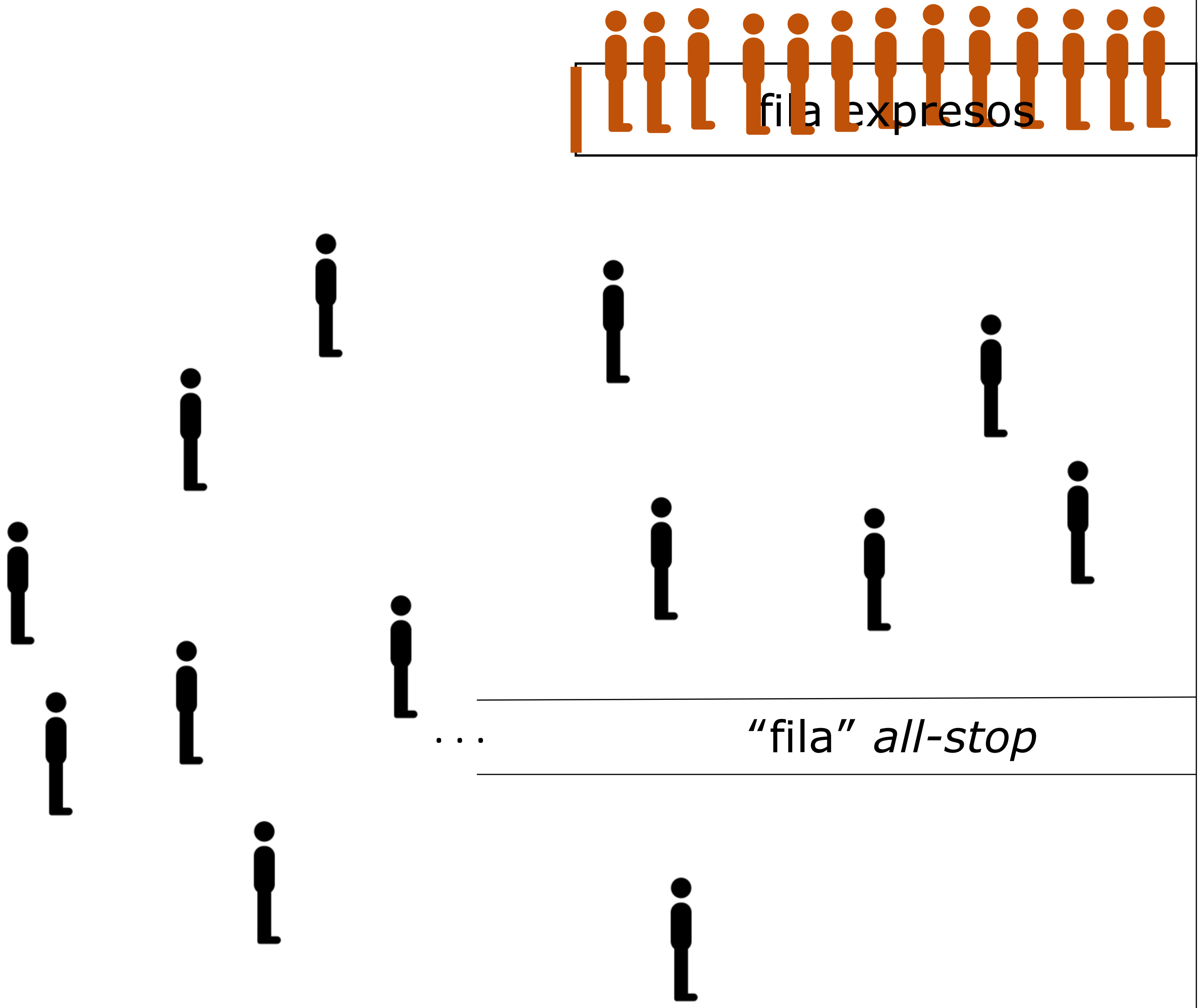
2.

$$f_E > \widehat{f}_E$$



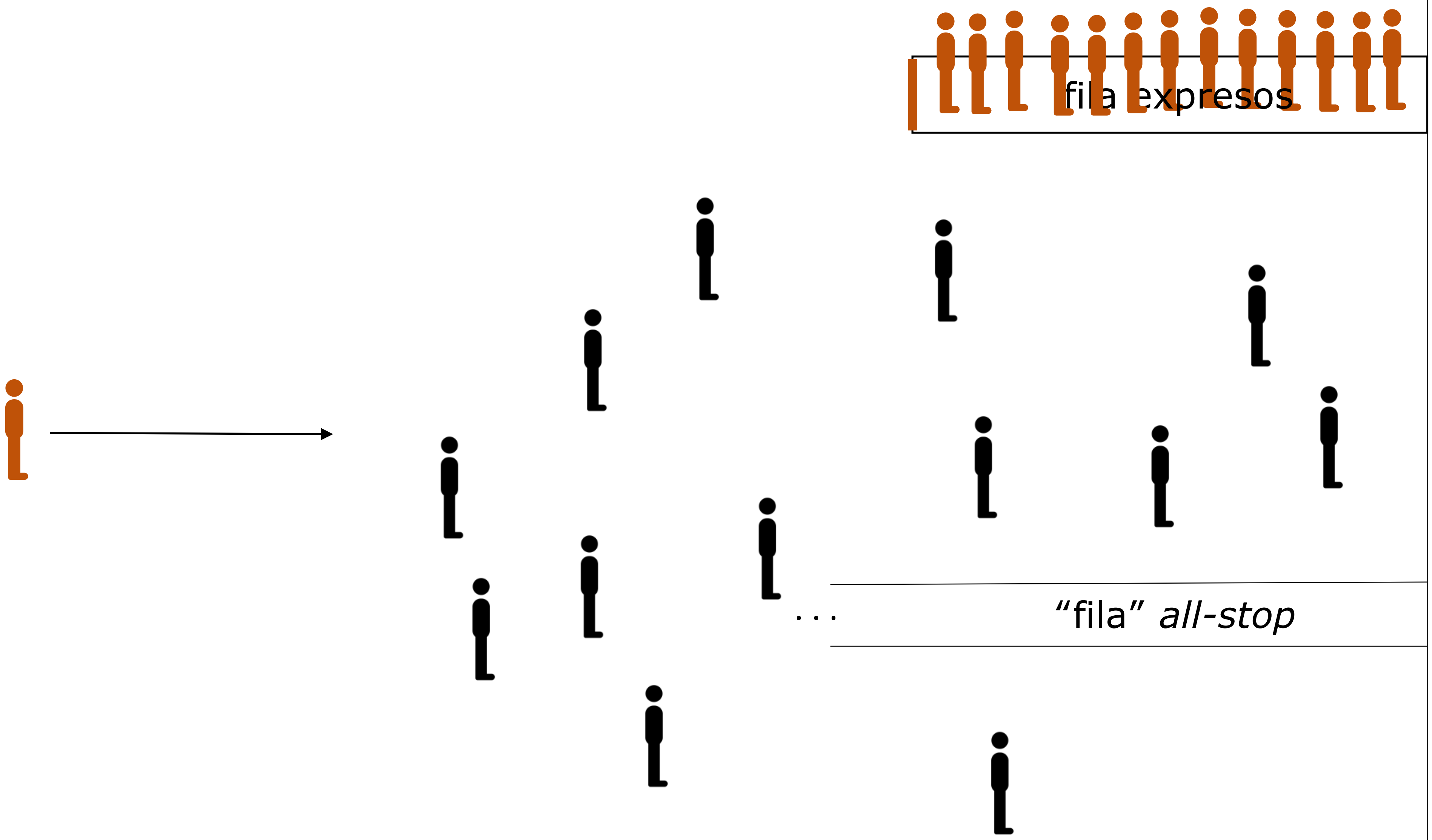
2.

$$f_E > \widehat{f}_E$$



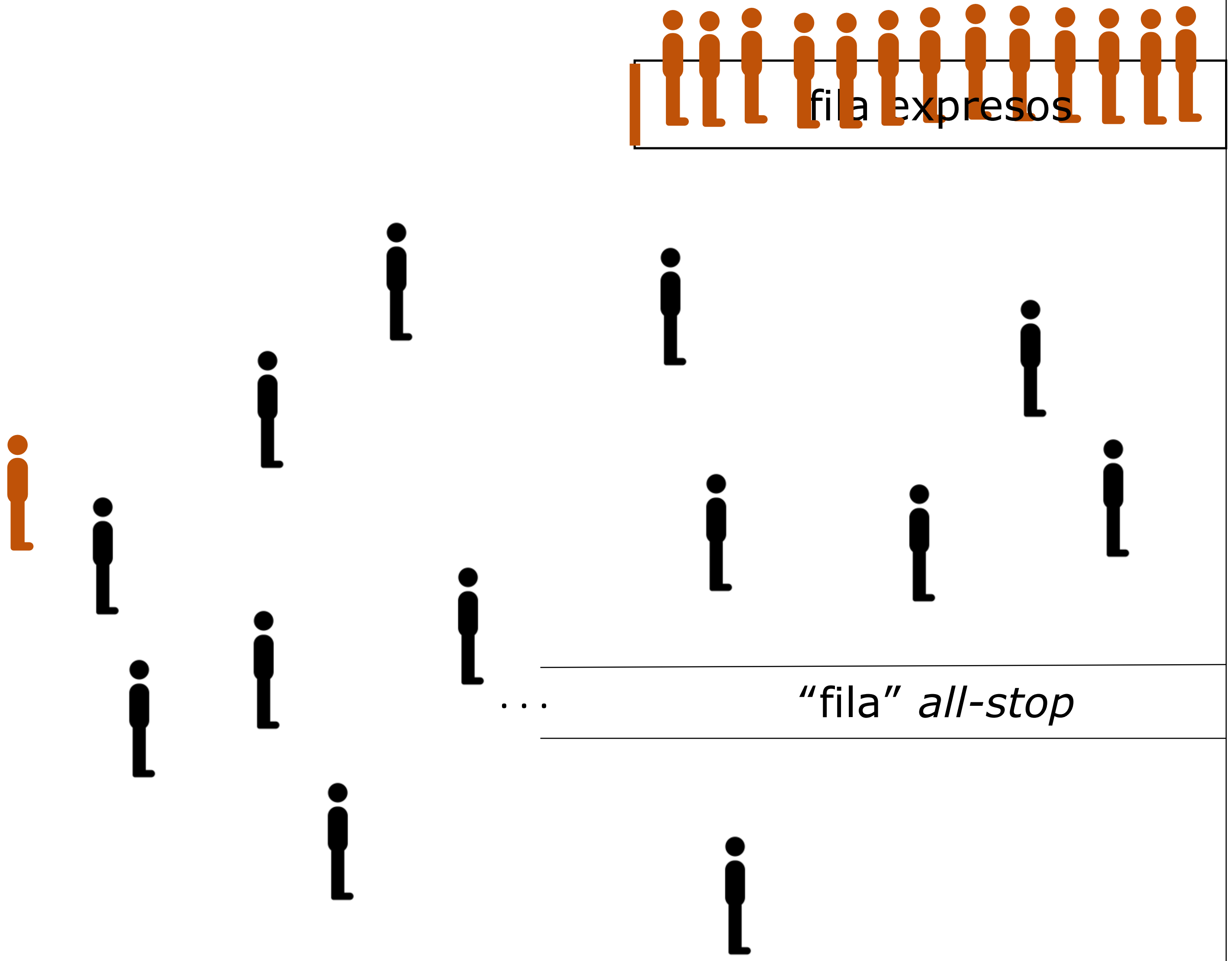
2.

$$f_E > \widehat{f_E}$$



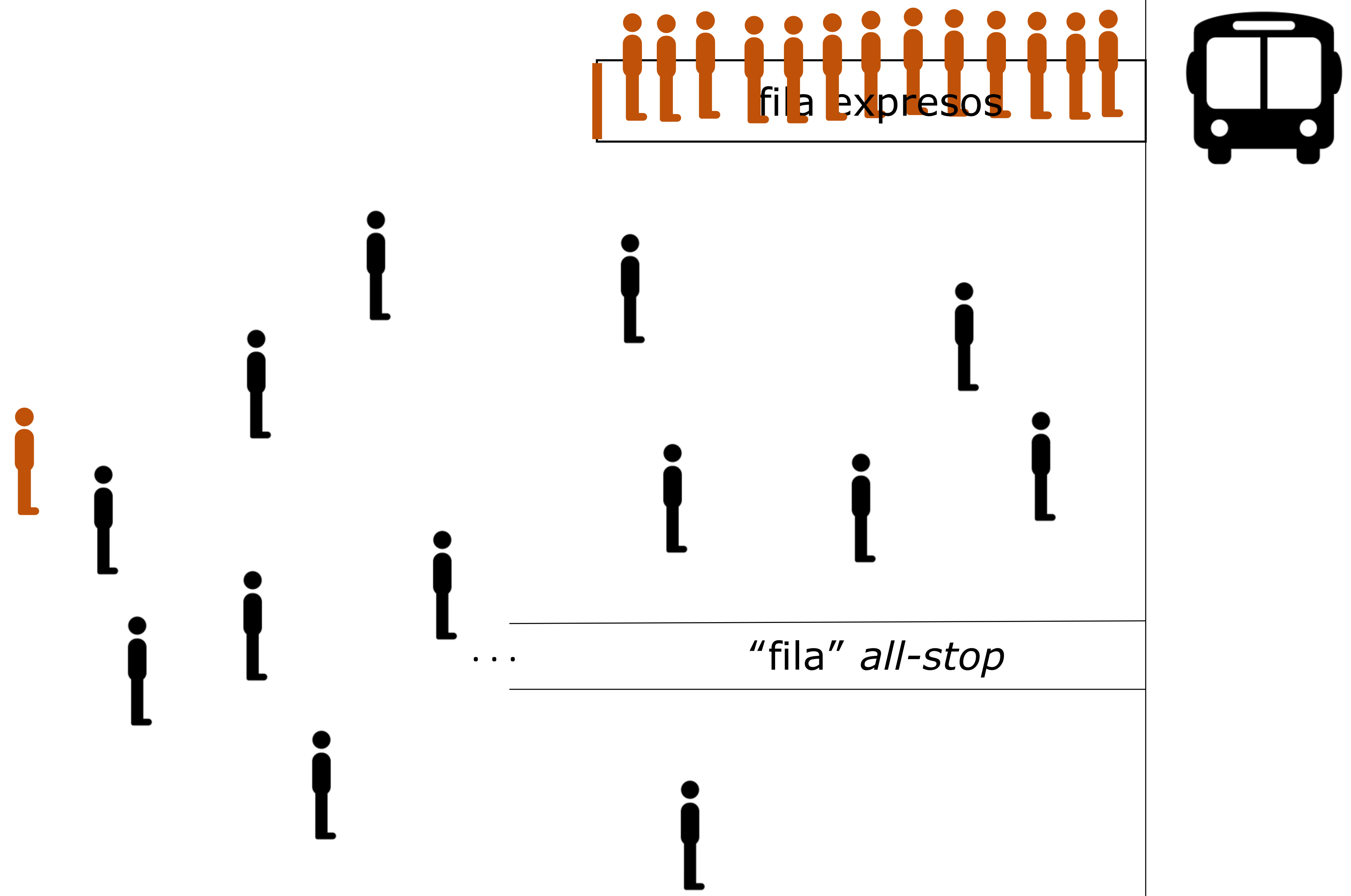
2.

$$f_E > \widehat{f_E}$$



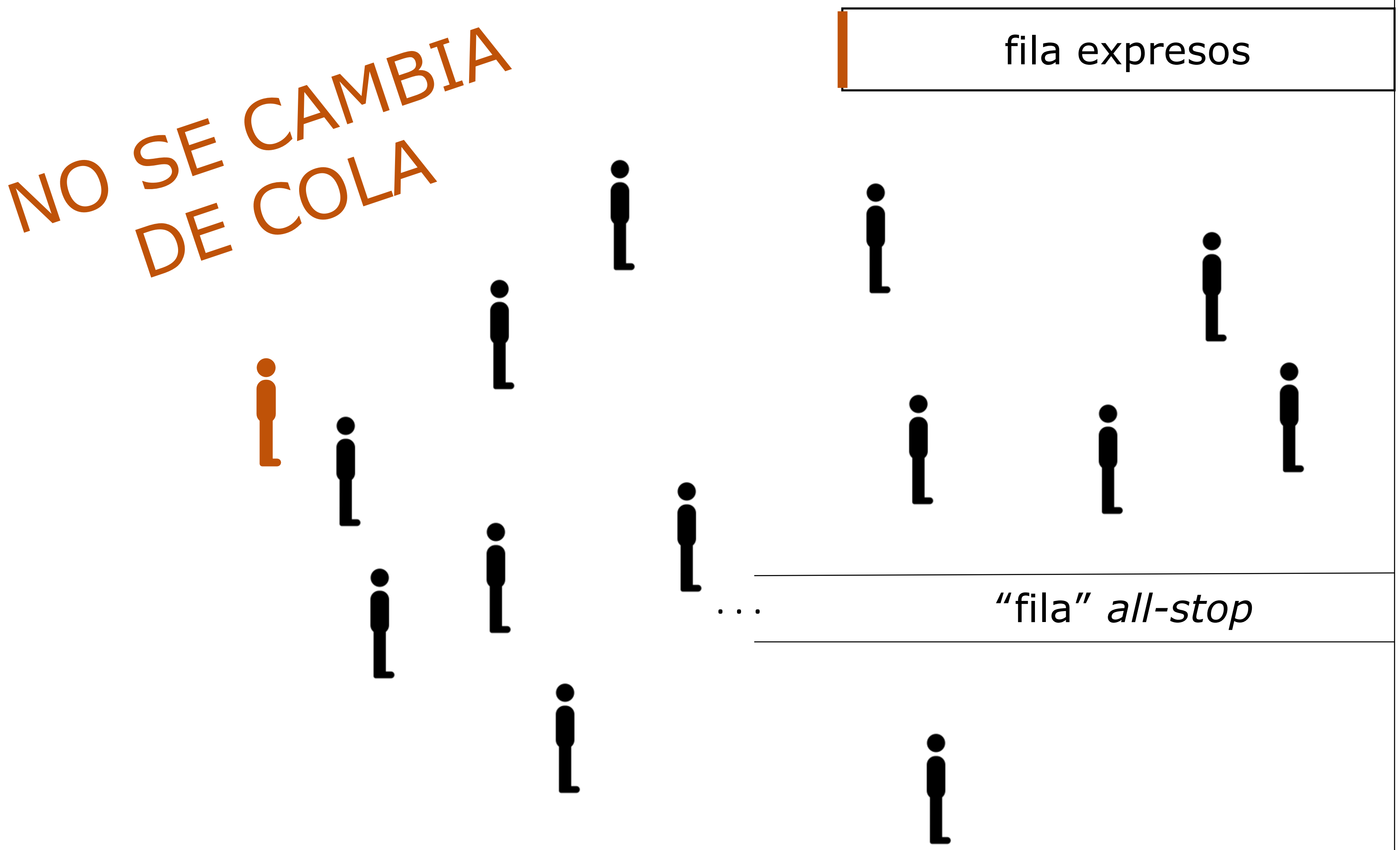
2.

$$f_E > \widehat{f}_E$$



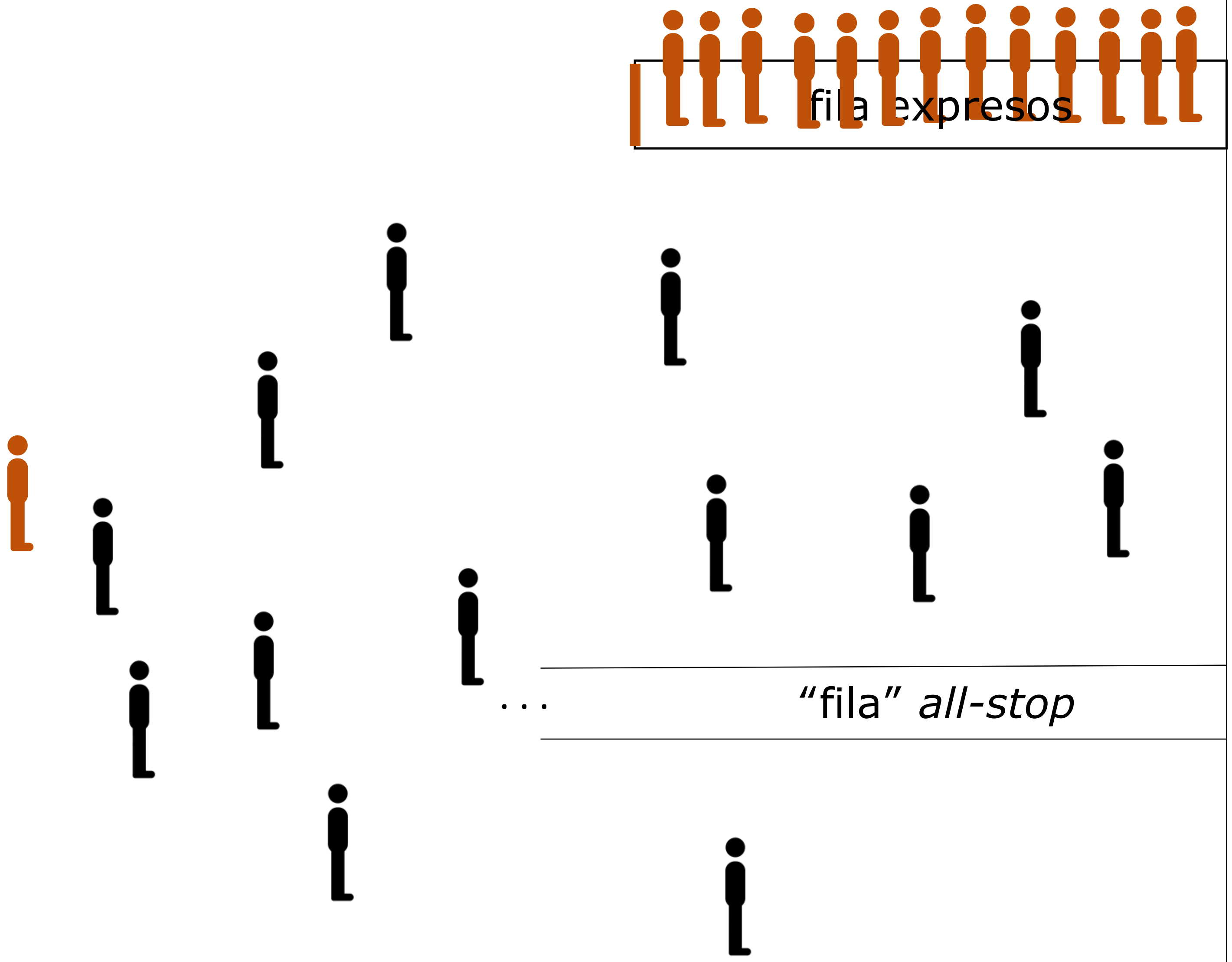
2.

$$f_E > \widehat{f}_E$$



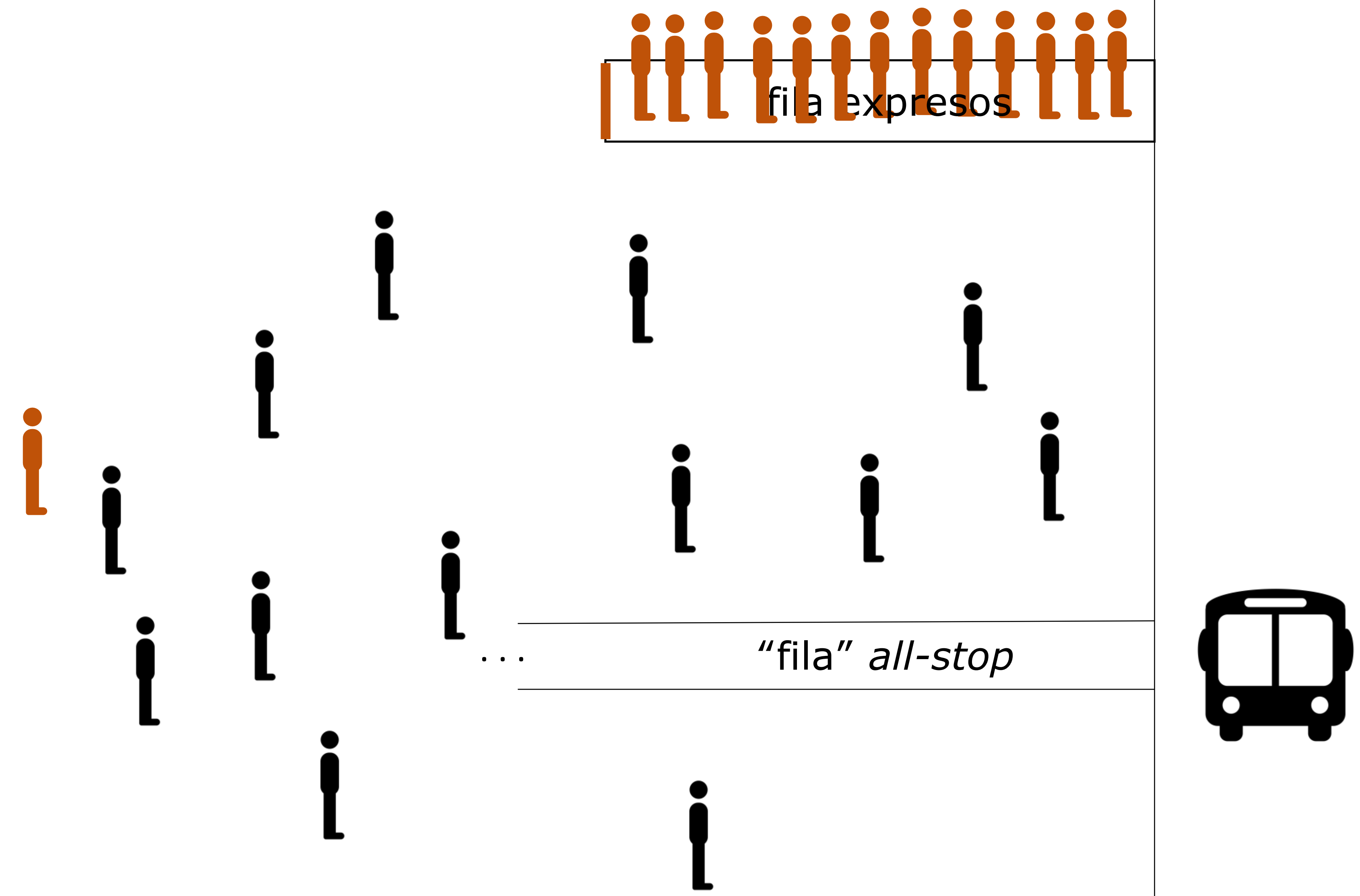
2.

$$f_E > \widehat{f_E}$$



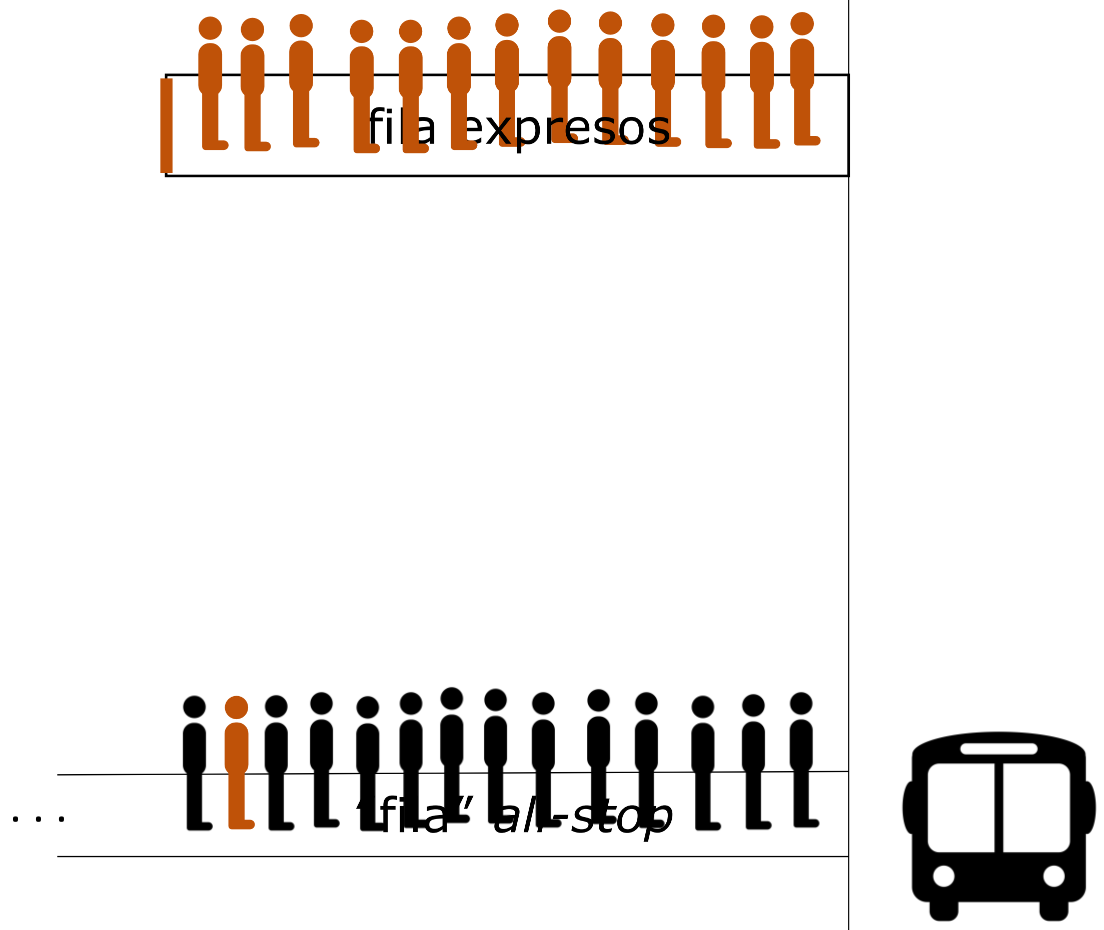
2.

$$f_E > \widehat{f_E}$$



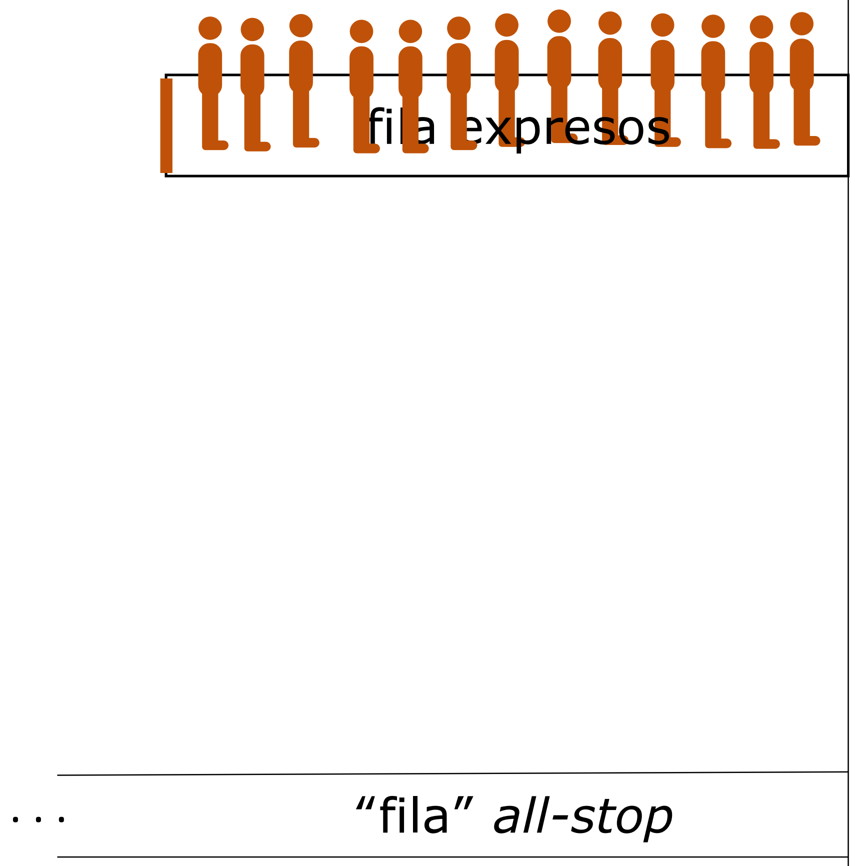
2.

$$f_E > \widehat{f}_E$$

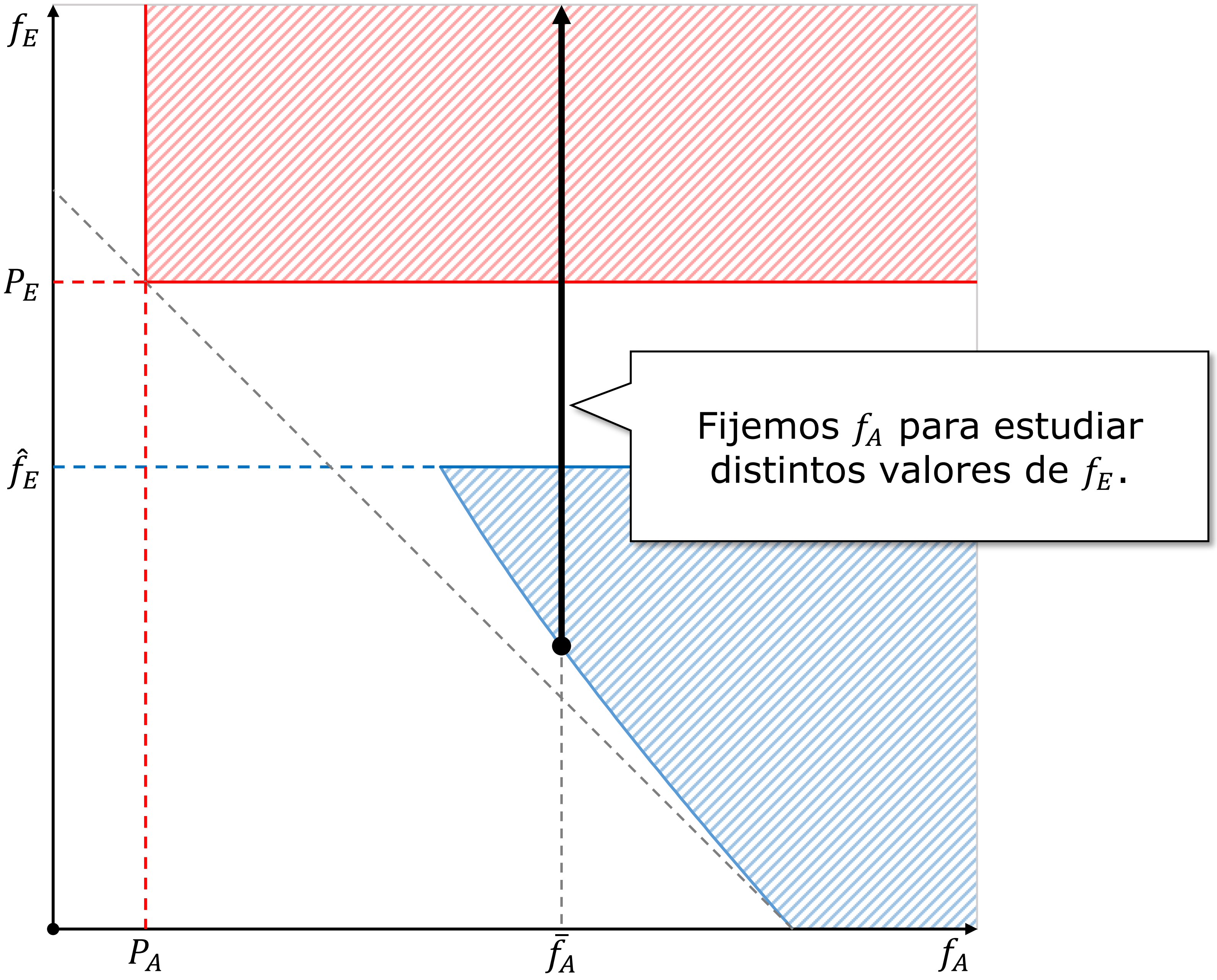


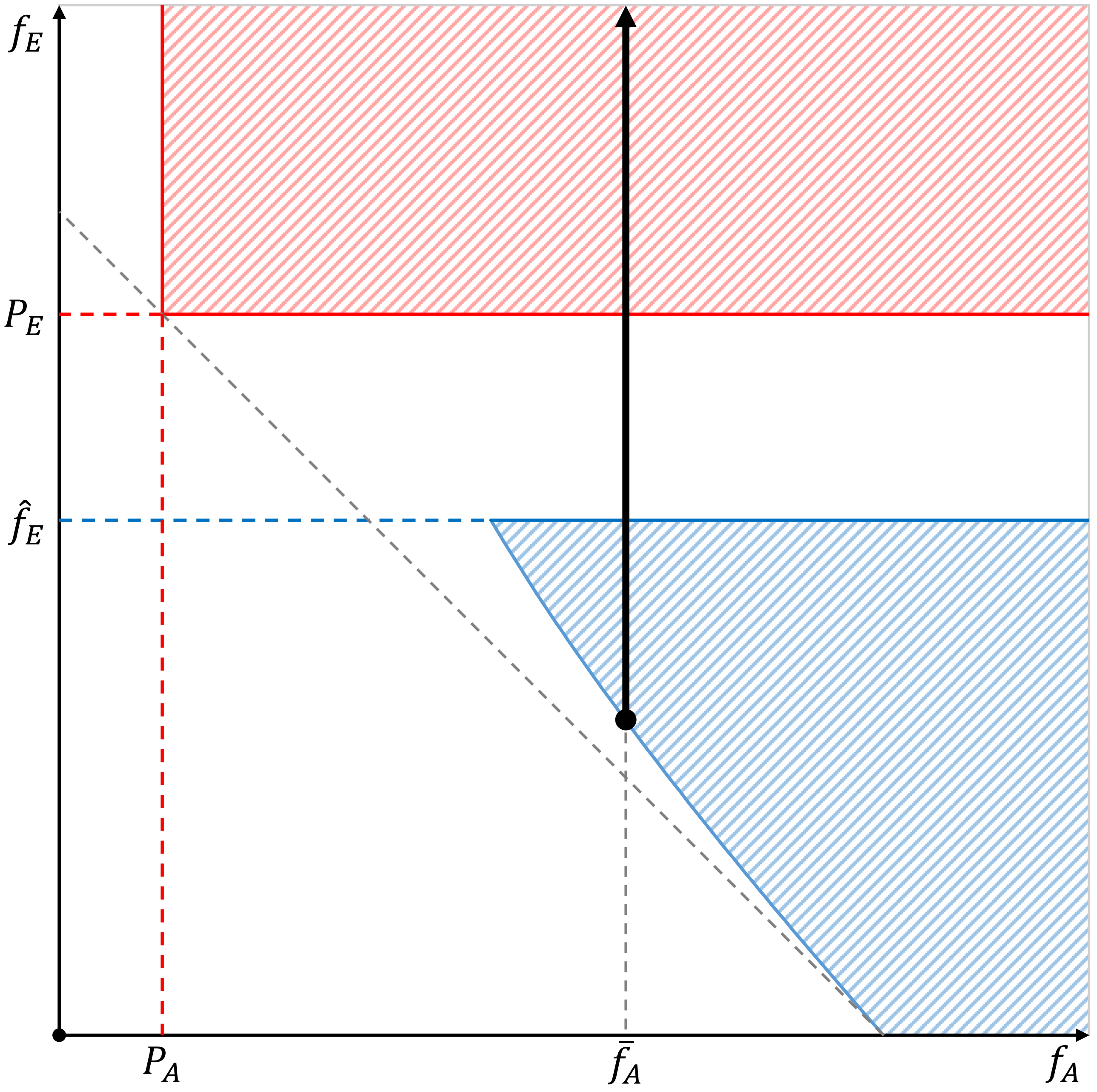
2.

$$f_E > \widehat{f}_E$$



DISEÑO DE EXPERIMENTO

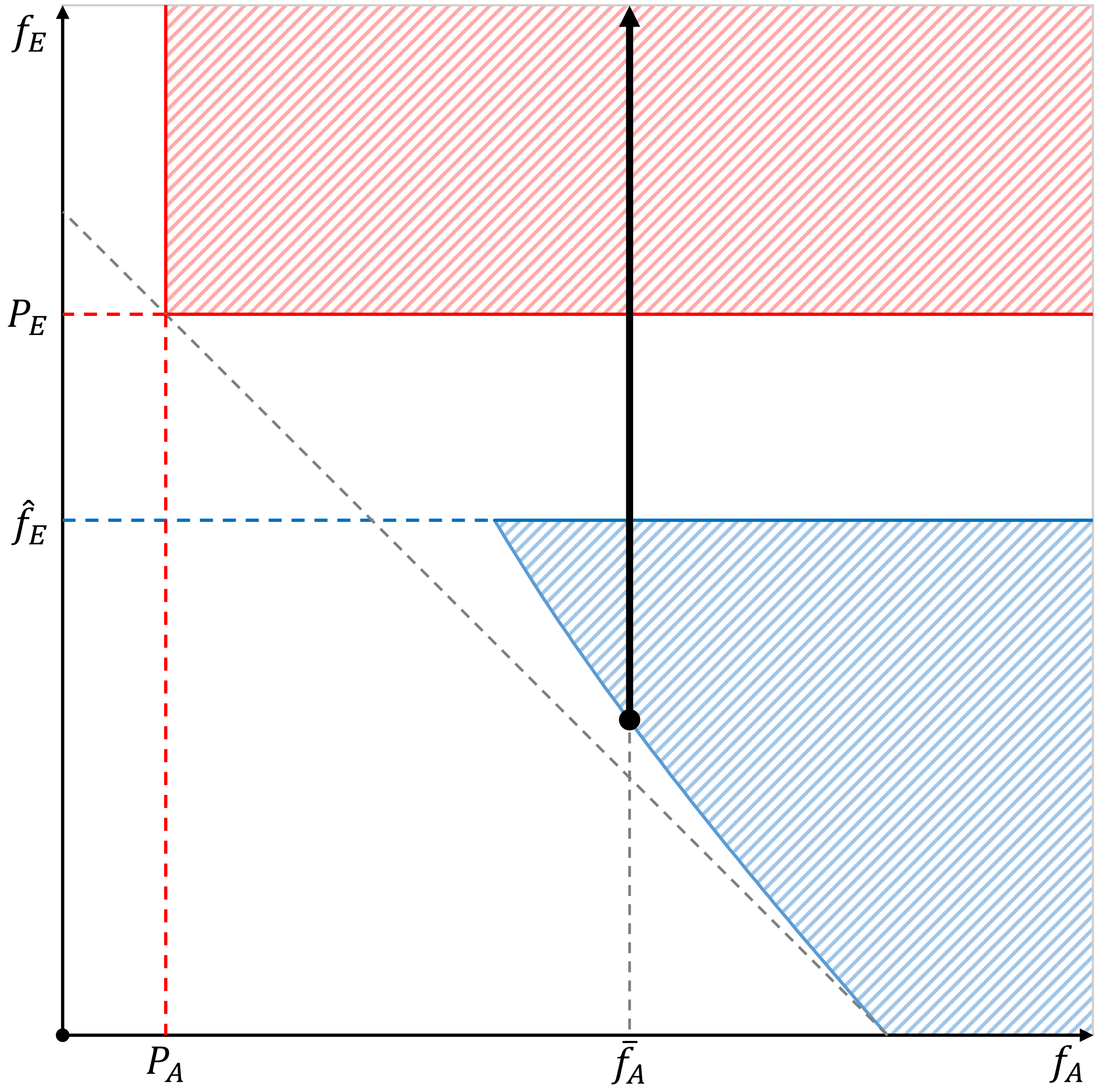

f_E
P_E
$\hat{f}_E$
P_A
$\bar{f}_A$
f_A
Fijemos f_A para estudiar distintos valores de f_E.



Cada individuo que llegue al paradero calculará:

$$C_{\{A,E\}} \neq C_{\{E\}}$$

Y en función de esto se debiese dar $\hat{f}_E$.



Cada individuo que llegue al paradero calculará:

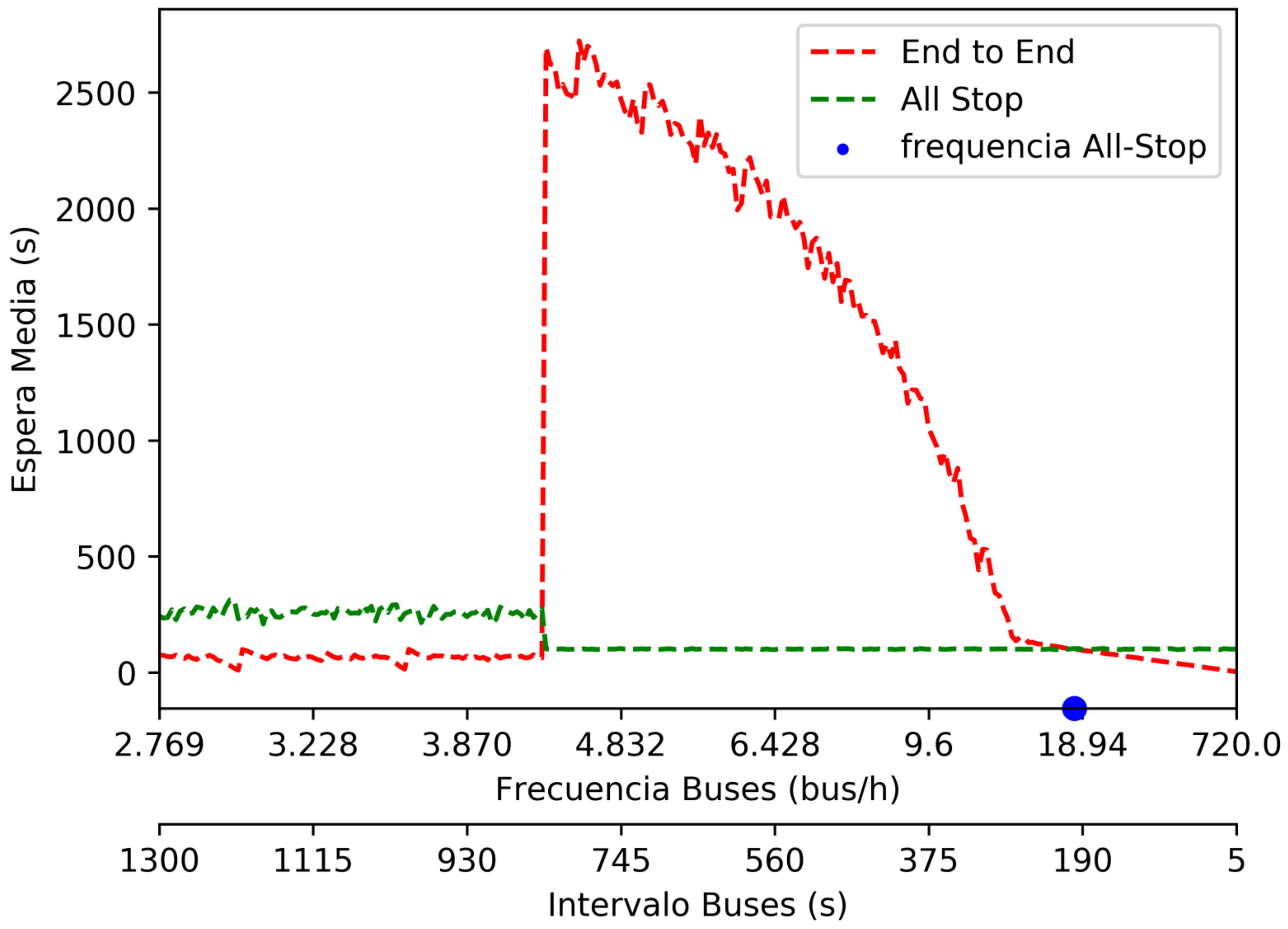
$$C_{\{A,E\}} \neq C_{\{E\}}$$

Y en función de esto se debiese dar $\hat{f}_E$.

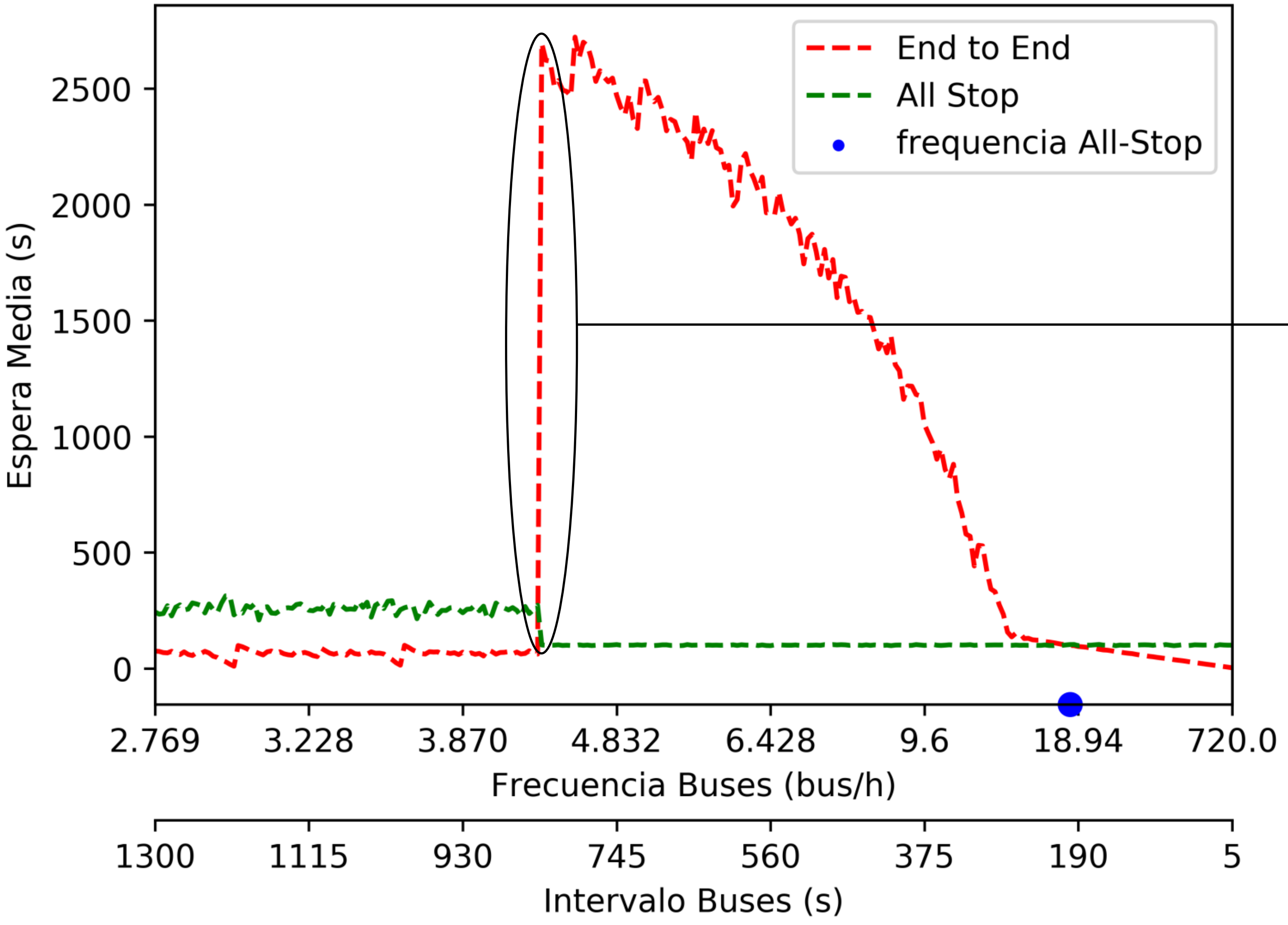
De manera similar, cuando f_E sea lo suficientemente alta, debiésemos encontrar P_E.

RESULTADOS

Buses con llegadas regulares

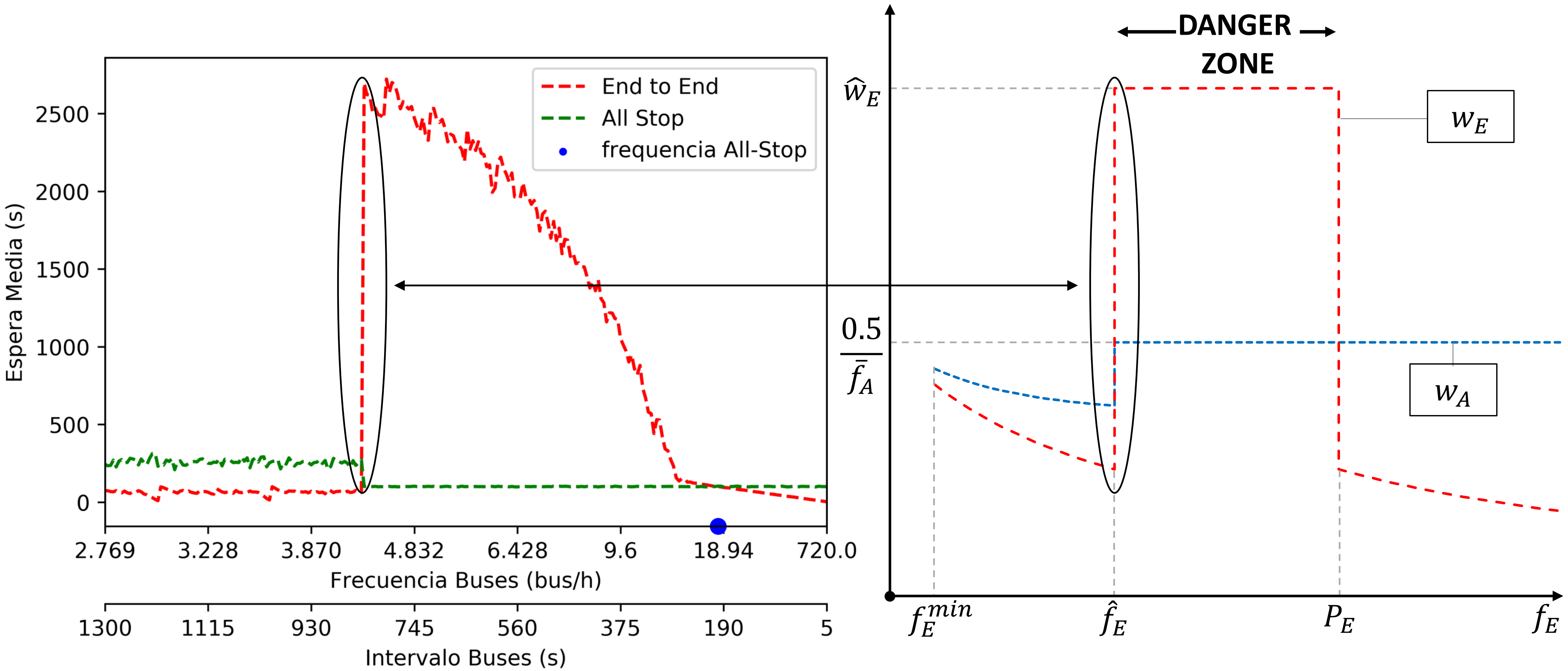


Buses con llegadas regulares

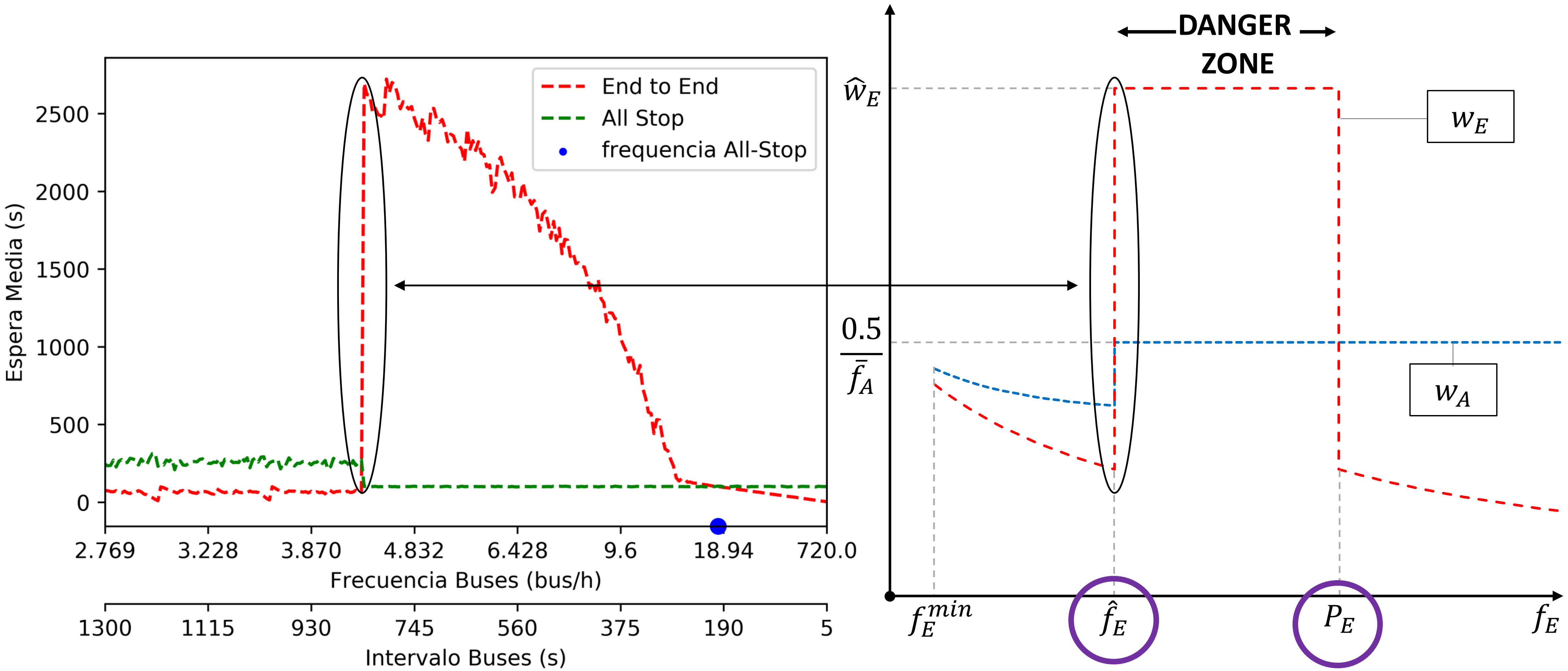


Salto en el nivel de servicio

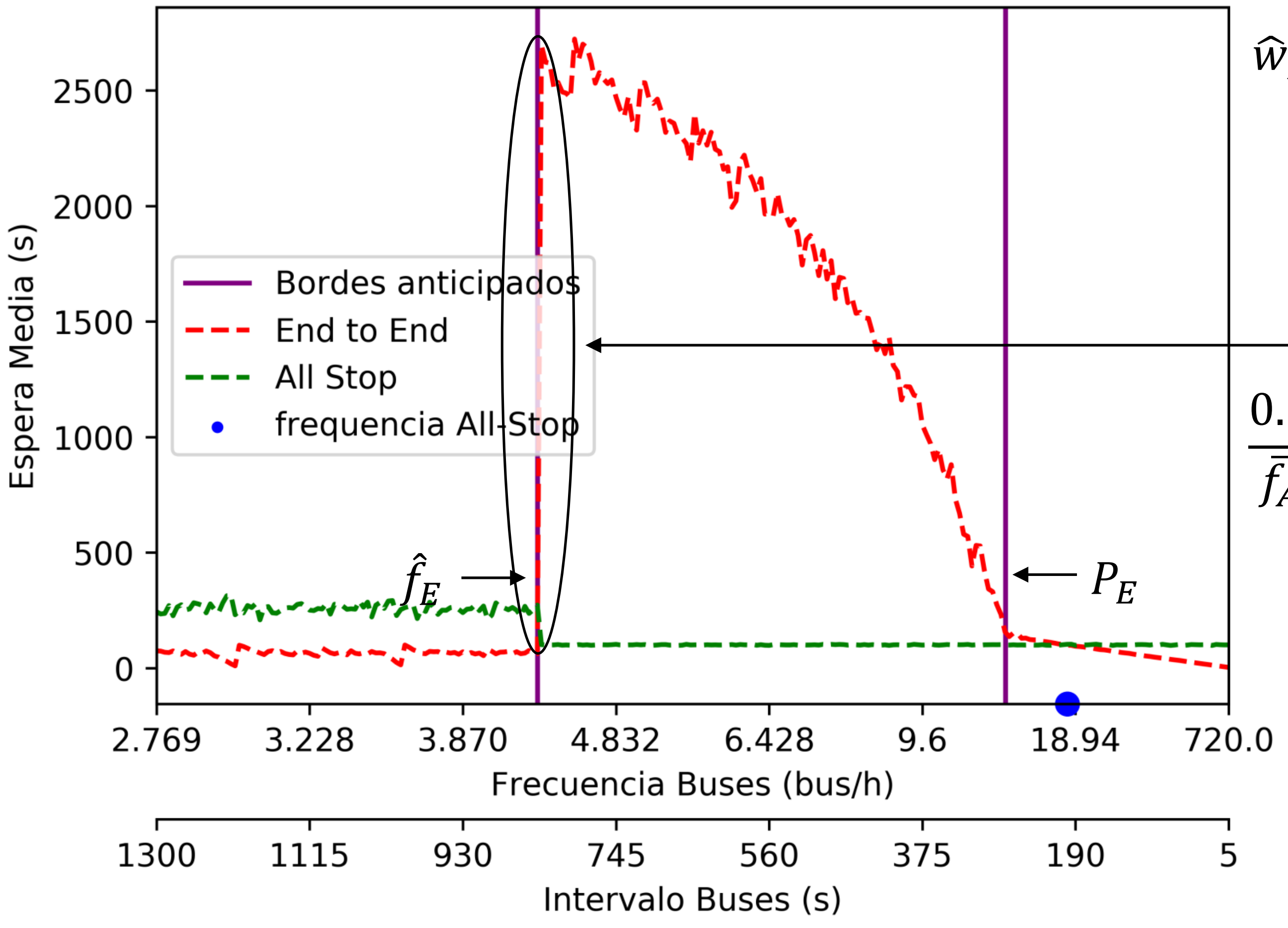
Buses con llegadas regulares

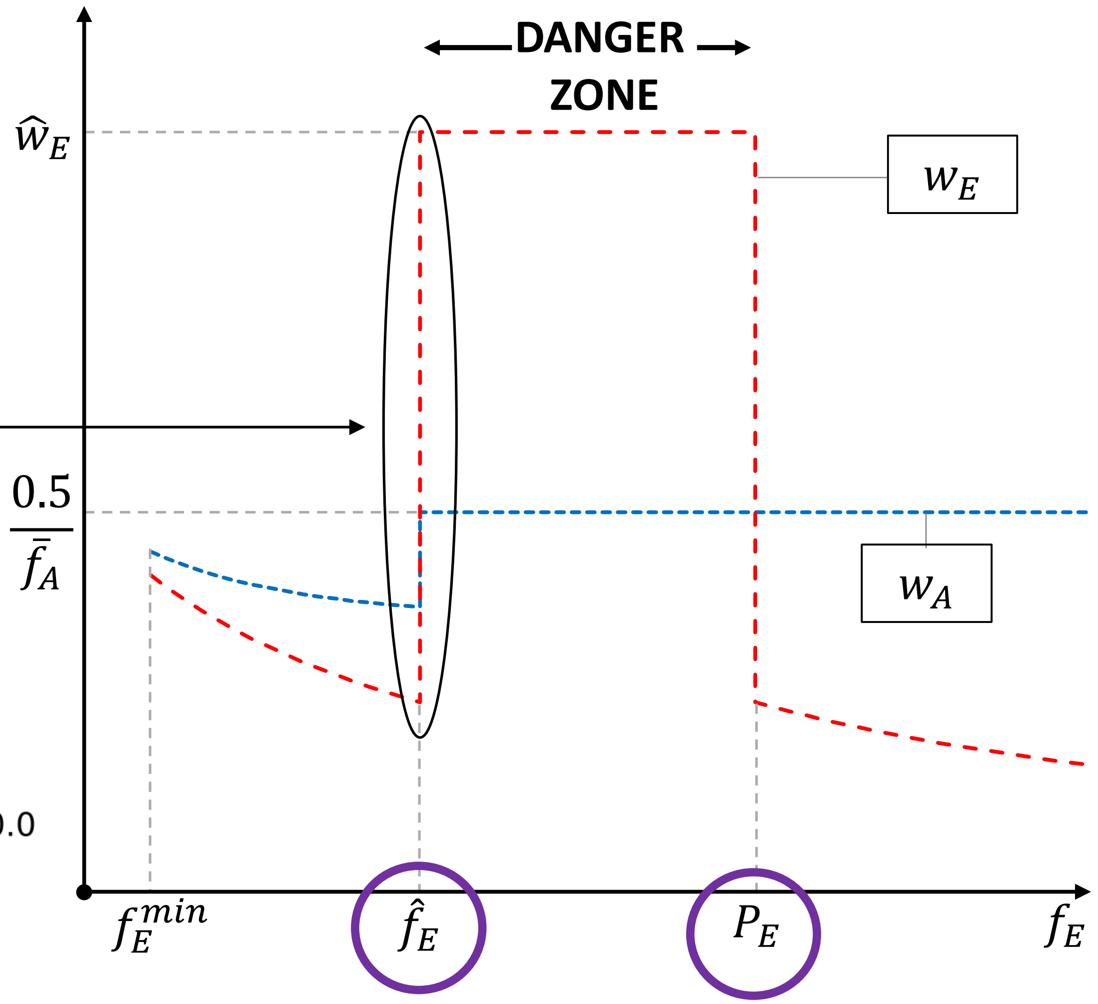


Buses con llegadas regulares

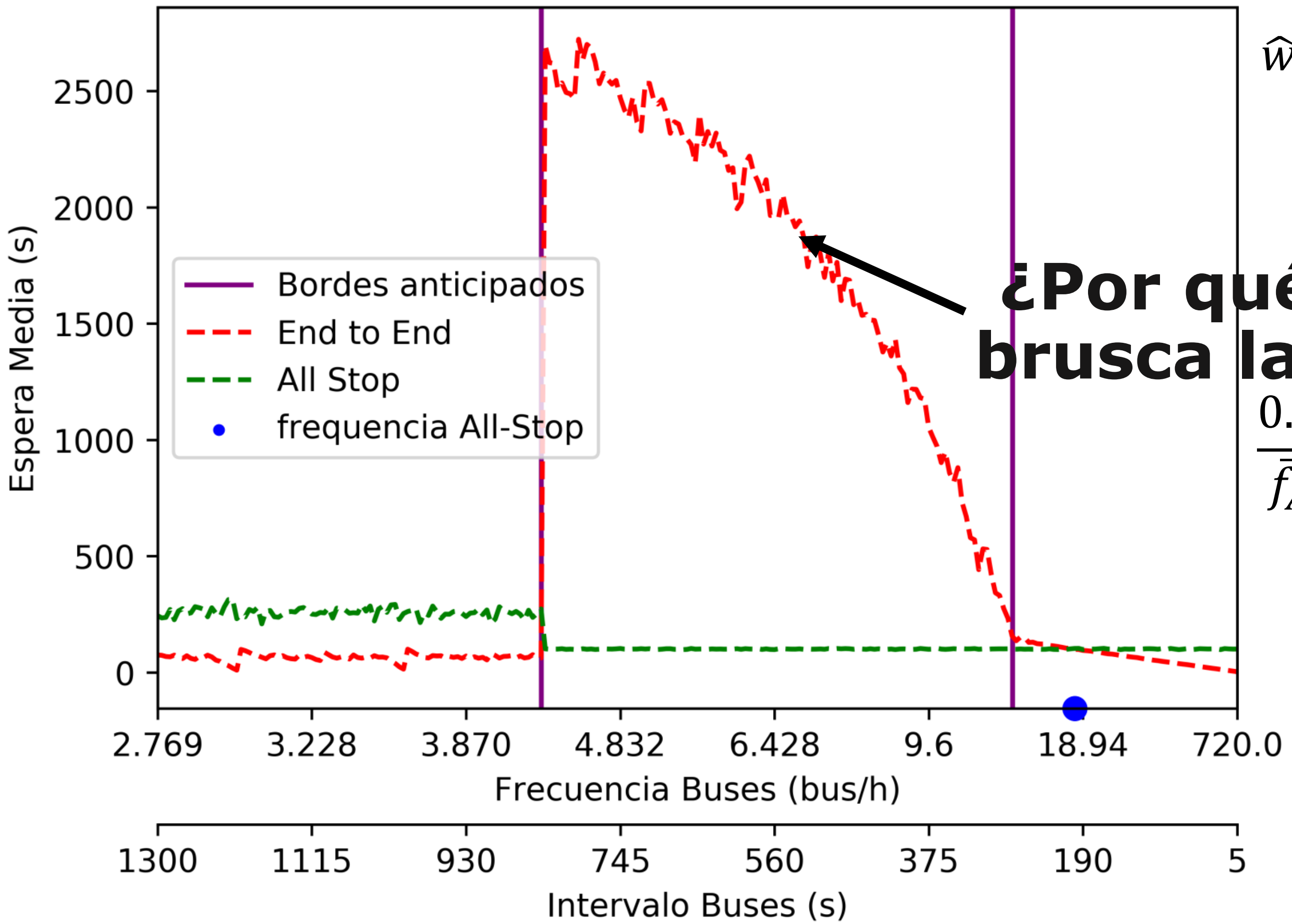


Buses con llegadas regulares

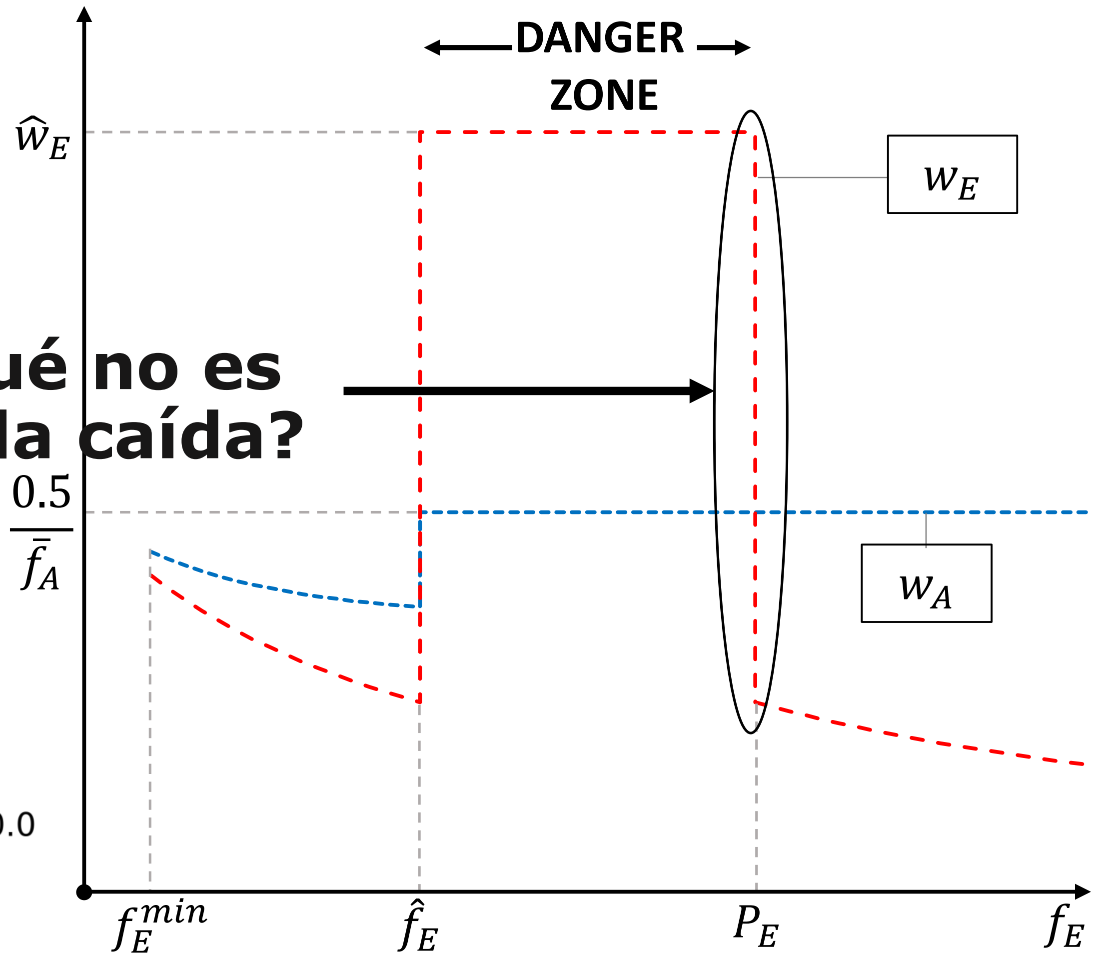




Buses con llegadas regulares

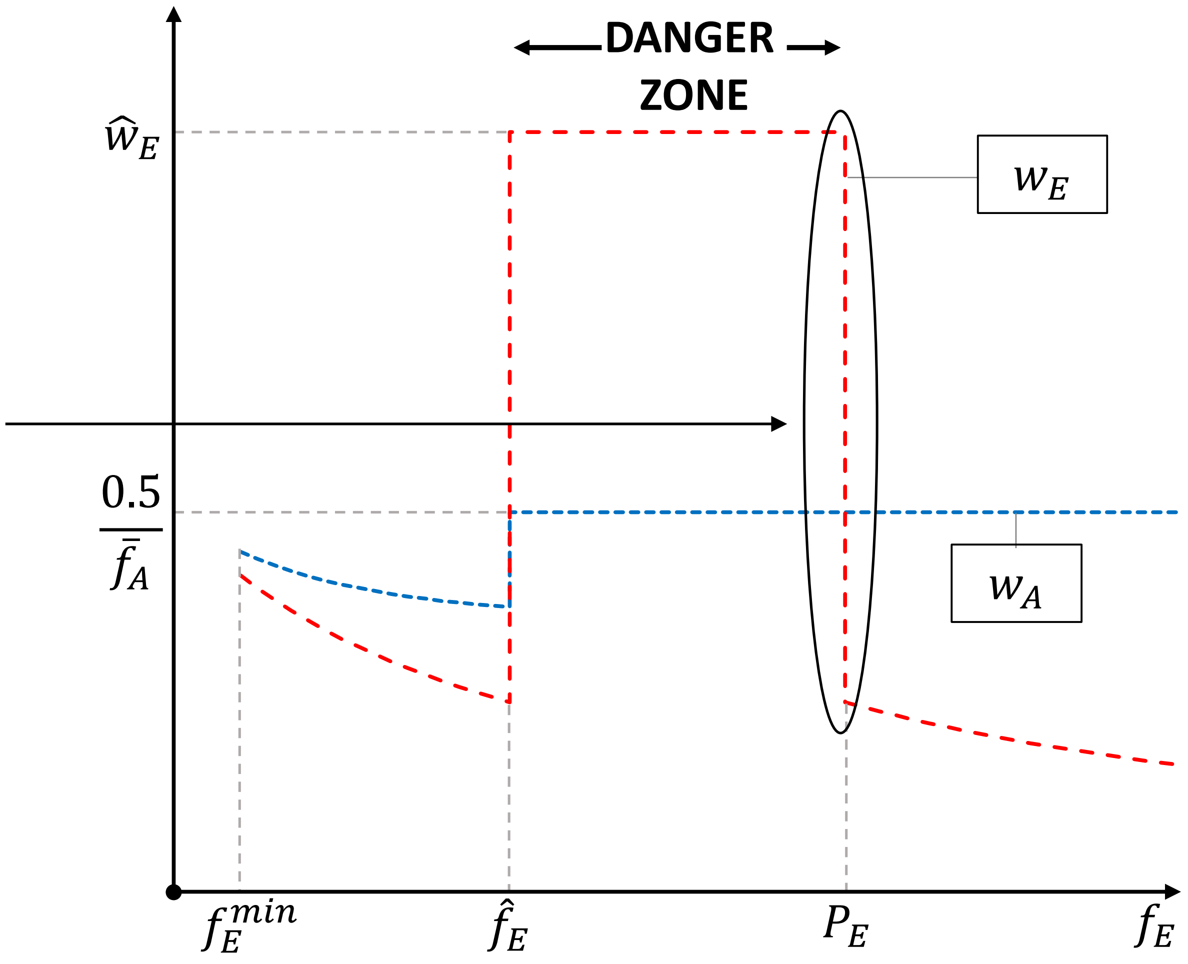


¿Por qué no es brusca la caída?



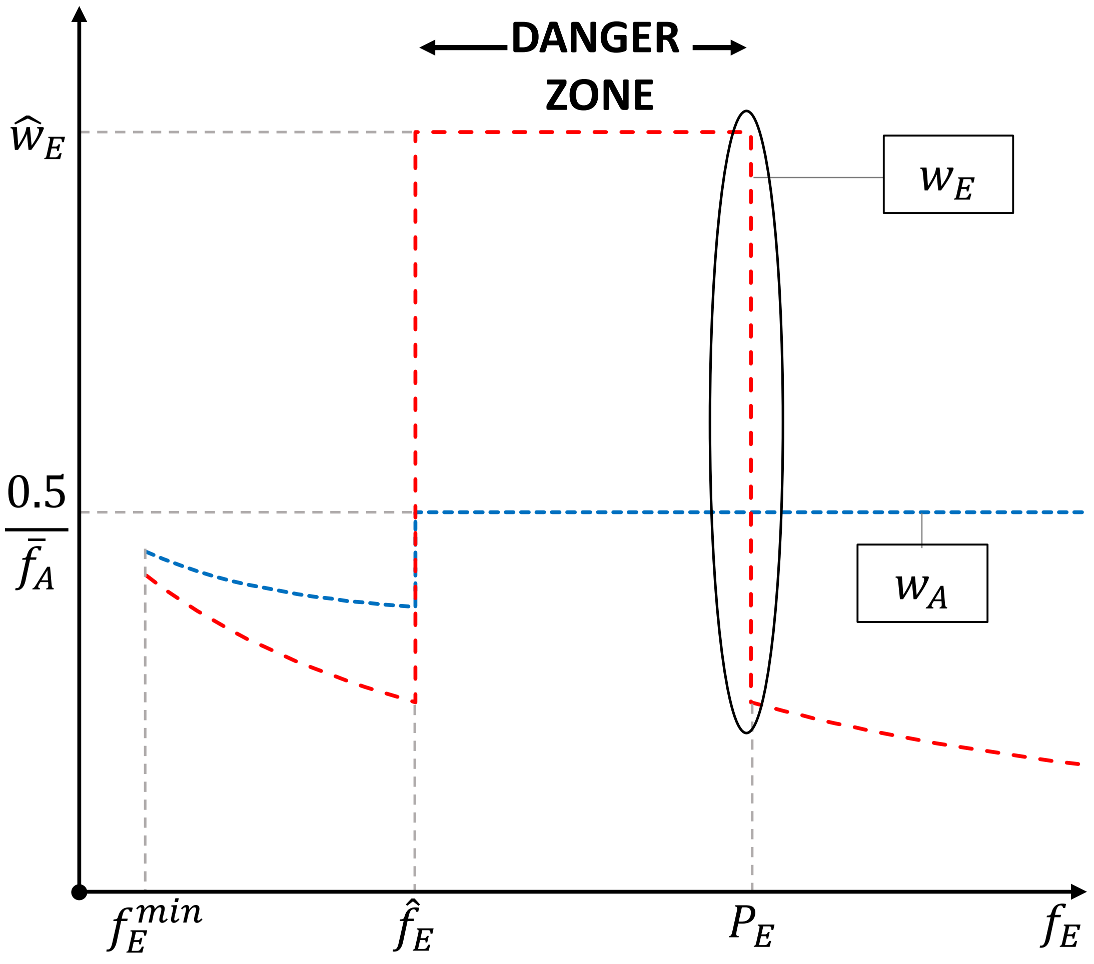
¿Por qué no es brusca la caída?

Esta caída está dada por una aproximación. En particular, considerar un “bus infinito” en vez de un bus entero causa la caída.



¿Por qué no es brusca la caída?

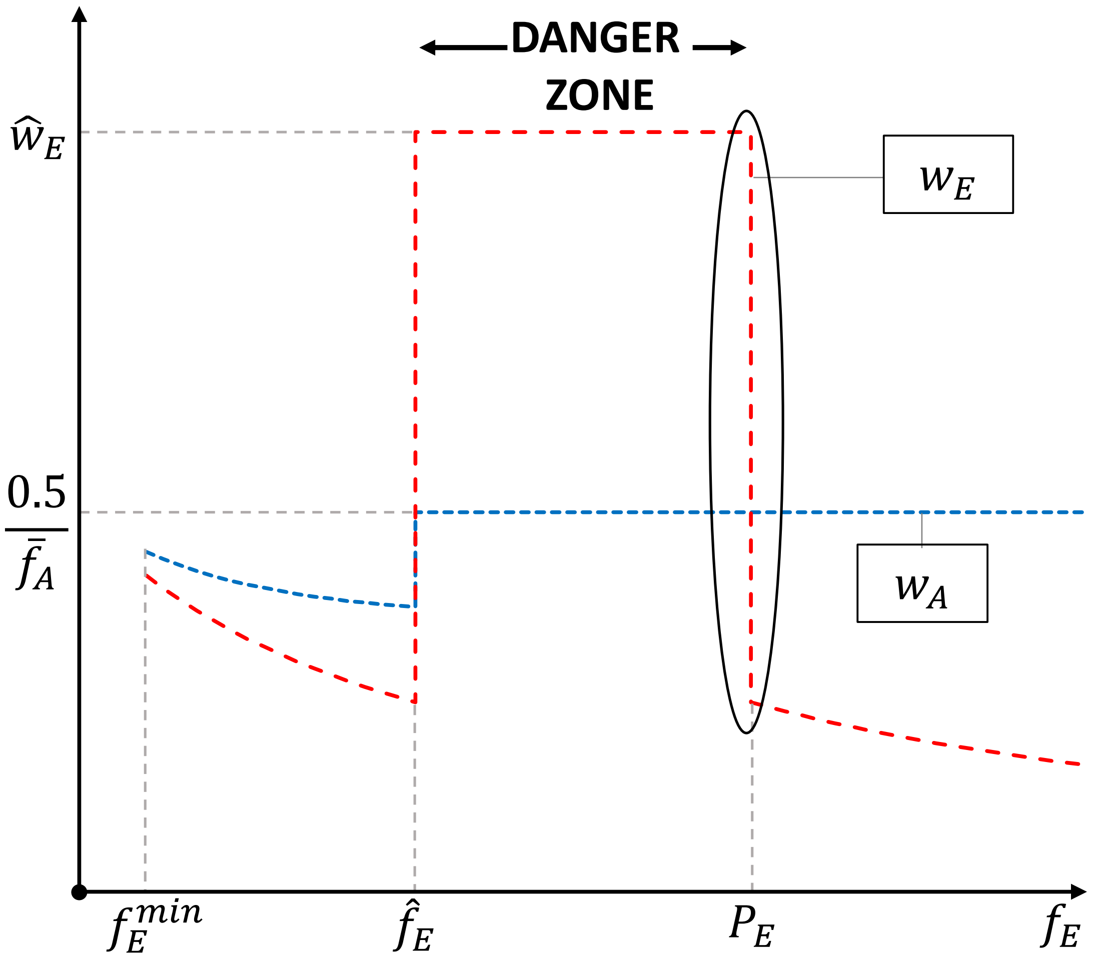
Por ejemplo: 2300 usuarios flexibles en 7200 segundos



¿Por qué no es brusca la caída?

Por ejemplo: 2300 usuarios flexibles en 7200 segundos

$$L_E = \frac{2300}{7200} = 0.32\ \frac{personas}{segundo} \approx$$ 1 persona cada 3 segundos

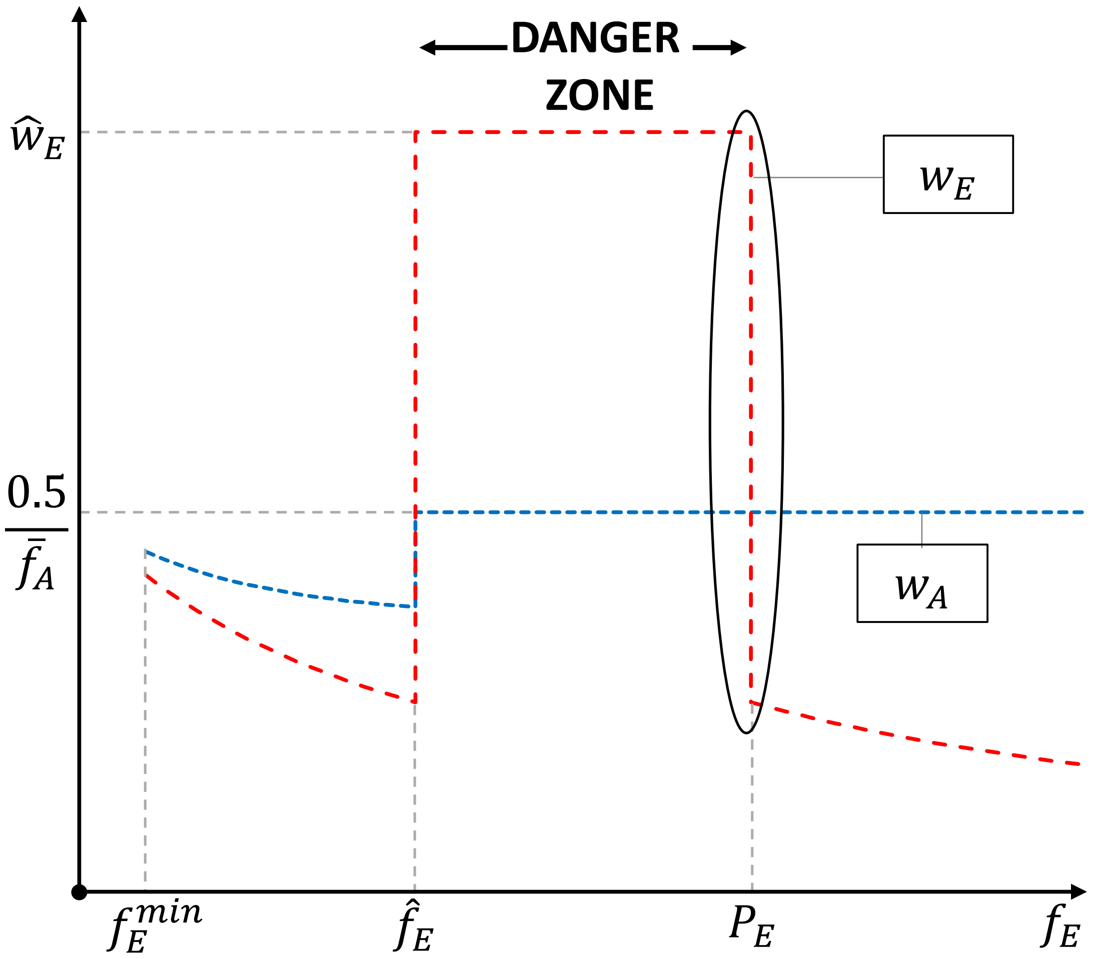


¿Por qué no es brusca la caída?

Por ejemplo: 2300 usuarios flexibles en 7200 segundos

$$L_E = \frac{2300}{7200} = 0.32\ \frac{personas}{segundo} \approx$$ 1 persona cada 3 segundos

$$P_E = \frac{L_E}{b} = \frac{0.32}{200} = 0.0016\,\frac{personas}{segundo * bus}$$



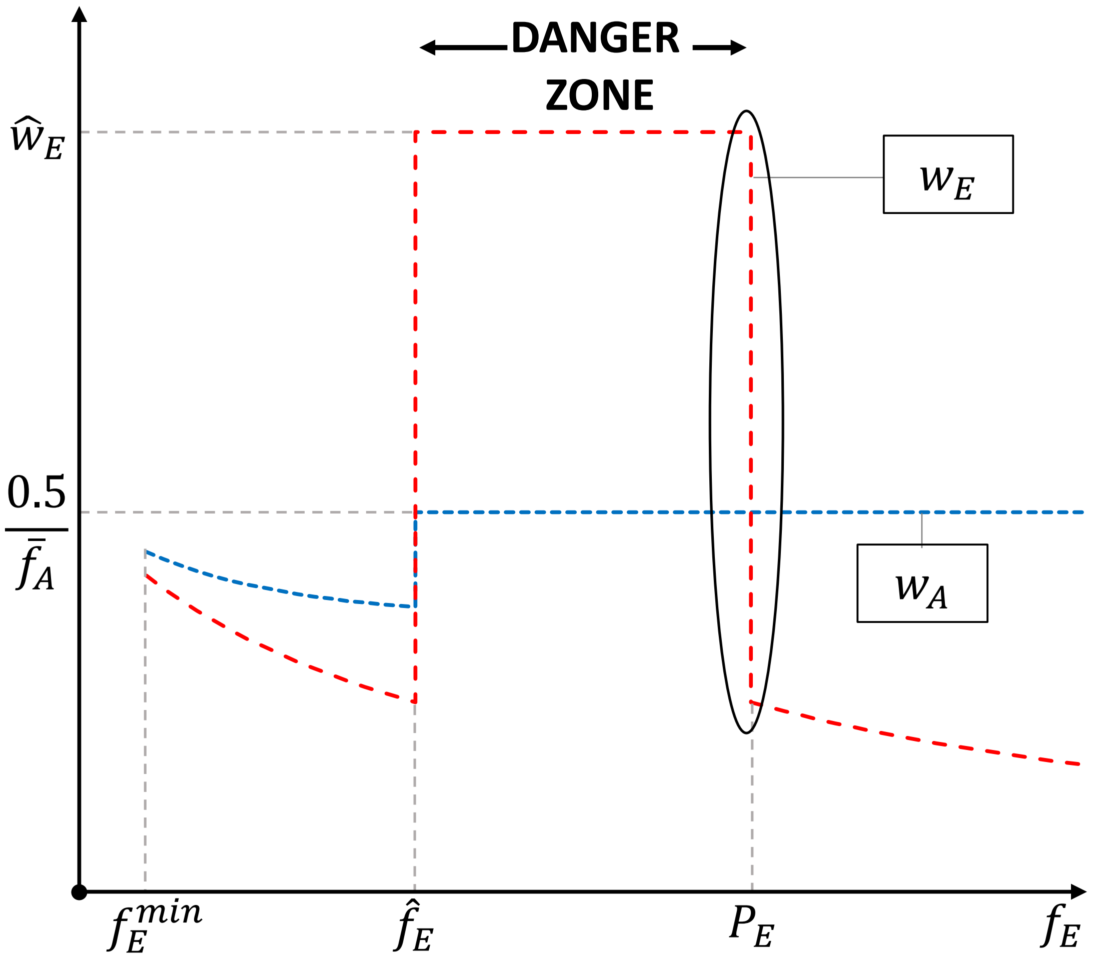
¿Por qué no es brusca la caída?

Por ejemplo: 2300 usuarios flexibles en 7200 segundos

$$L_E = \frac{2300}{7200} = 0.32\ \frac{personas}{segundo} \approx$$ 1 persona cada 3 segundos

$$P_E = \frac{L_E}{b} = \frac{0.32}{200} = 0.0016 \frac{personas}{segundo * bus}$$

Un bus infinito que lleve 0.0016 personas cada segundo o un bus finito que lleve 200 personas cada 625 segundos.



¿Por qué no es brusca la caída?

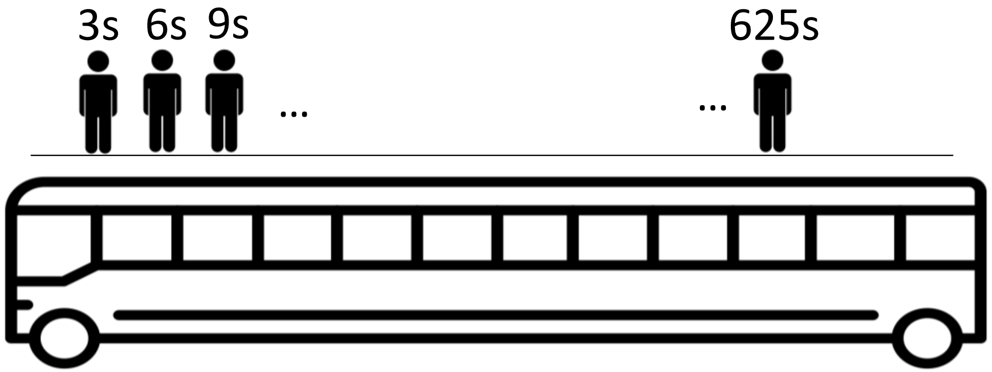
Por ejemplo: 2300 usuarios flexibles en 7200 segundos

$$L_E = \frac{2300}{7200} = 0.32\ \frac{personas}{segundo}$$ ≈ 1 persona cada 3 segundos

$$P_E = \frac{L_E}{b} = \frac{0.32}{200} = 0.0016 \frac{personas}{segundo * bus}$$

Un bus infinito que lleve 0.0016 personas cada segundo o un bus finito que lleve 200 personas cada 625 segundos.

Un bus infinito que lleve 0.0016 personas cada segundo:



Como el bus está constantemente pasando por el paradero, nadie nunca espera: la caída es abrupta.

¿Por qué no es brusca la caída?

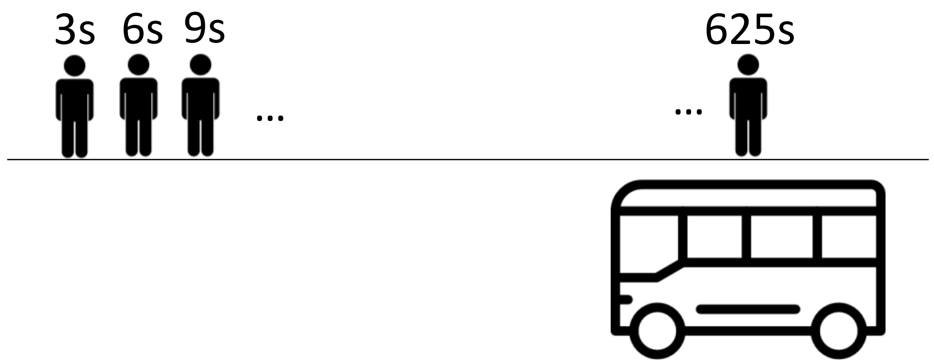
Por ejemplo: 2300 usuarios flexibles en 7200 segundos

$$L_E = \frac{2300}{7200} = 0.32\ \frac{personas}{segundo} \approx$$ 1 persona cada 3 segundos

$$P_E = \frac{L_E}{b} = \frac{0.32}{200} = 0.0016\frac{personas}{segundo * bus}$$

Un bus infinito que lleve 0.0016 personas cada segundo o un bus finito que lleve 200 personas cada 625 segundos.

Un bus finito que lleve 200 personas cada 625 segundos:



El primer usuario en llegar espera un poco menos de 625 segundos, el segundo un poco menos, el tercero…

¿Por qué no es brusca la caída?

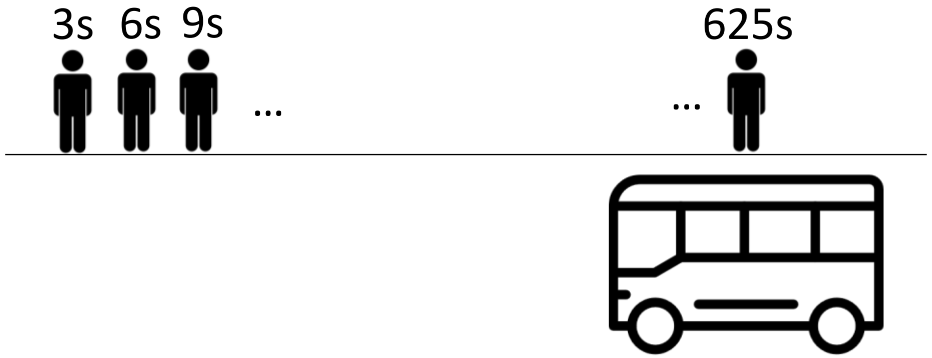
Por ejemplo: 2300 usuarios flexibles en 7200 segundos

$$L_E = \frac{2300}{7200} = 0.32\ \frac{personas}{segundo} \approx$$ 1 persona cada 3 segundos

$$P_E = \frac{L_E}{b} = \frac{0.32}{200} = 0.0016 \frac{personas}{segundo * bus}$$

Un bus infinito que lleve 0.0016 personas cada segundo o un bus finito que lleve 200 personas cada 625 segundos.

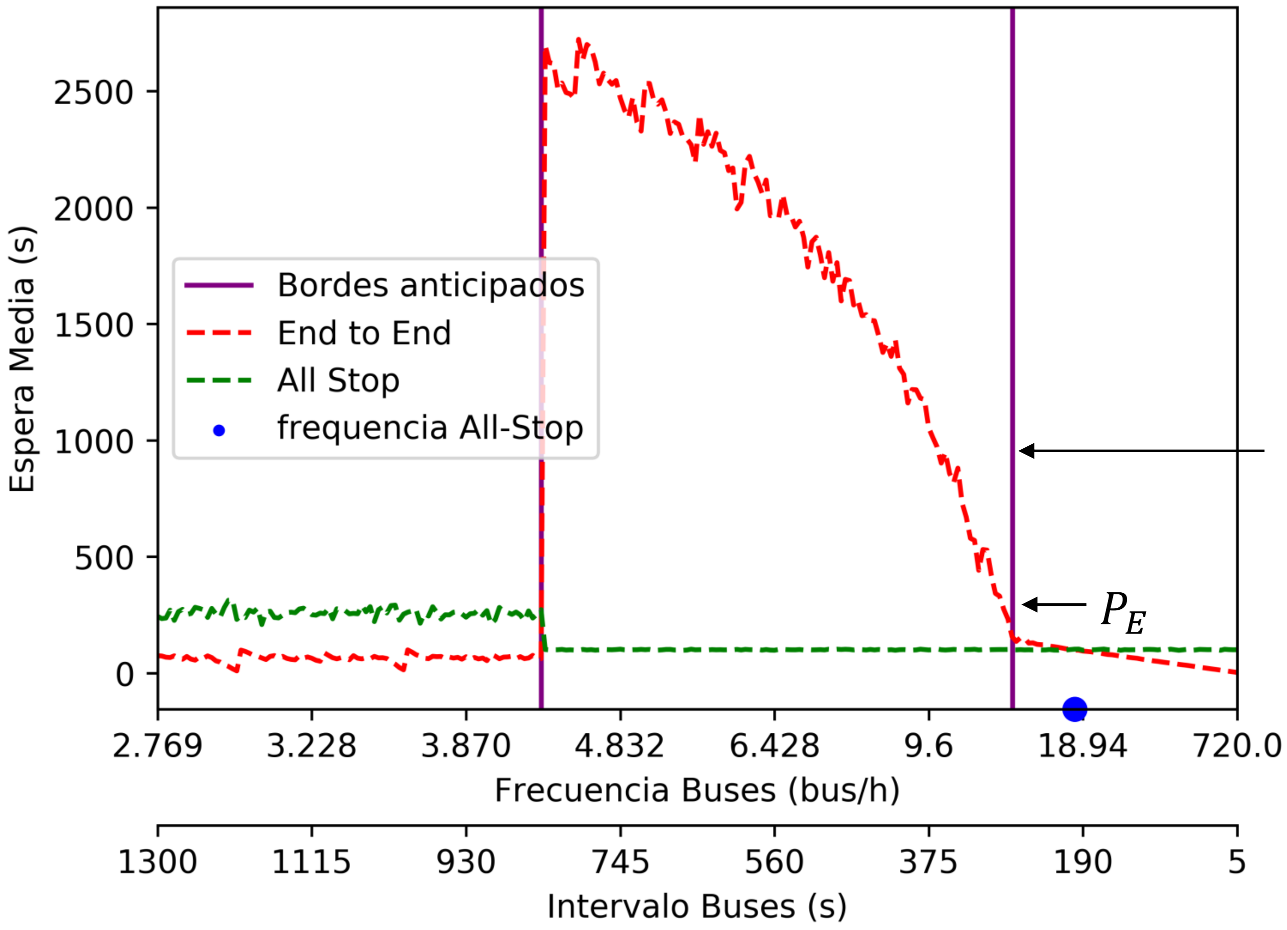
Un bus finito que lleve 200 personas cada 625 segundos:



El primer usuario en llegar espera un poco menos de 625 segundos, el segundo un poco menos, el tercero…

Hay espera, que disminuye si aumenta la frecuencia.

¿Entonces qué era el borde?

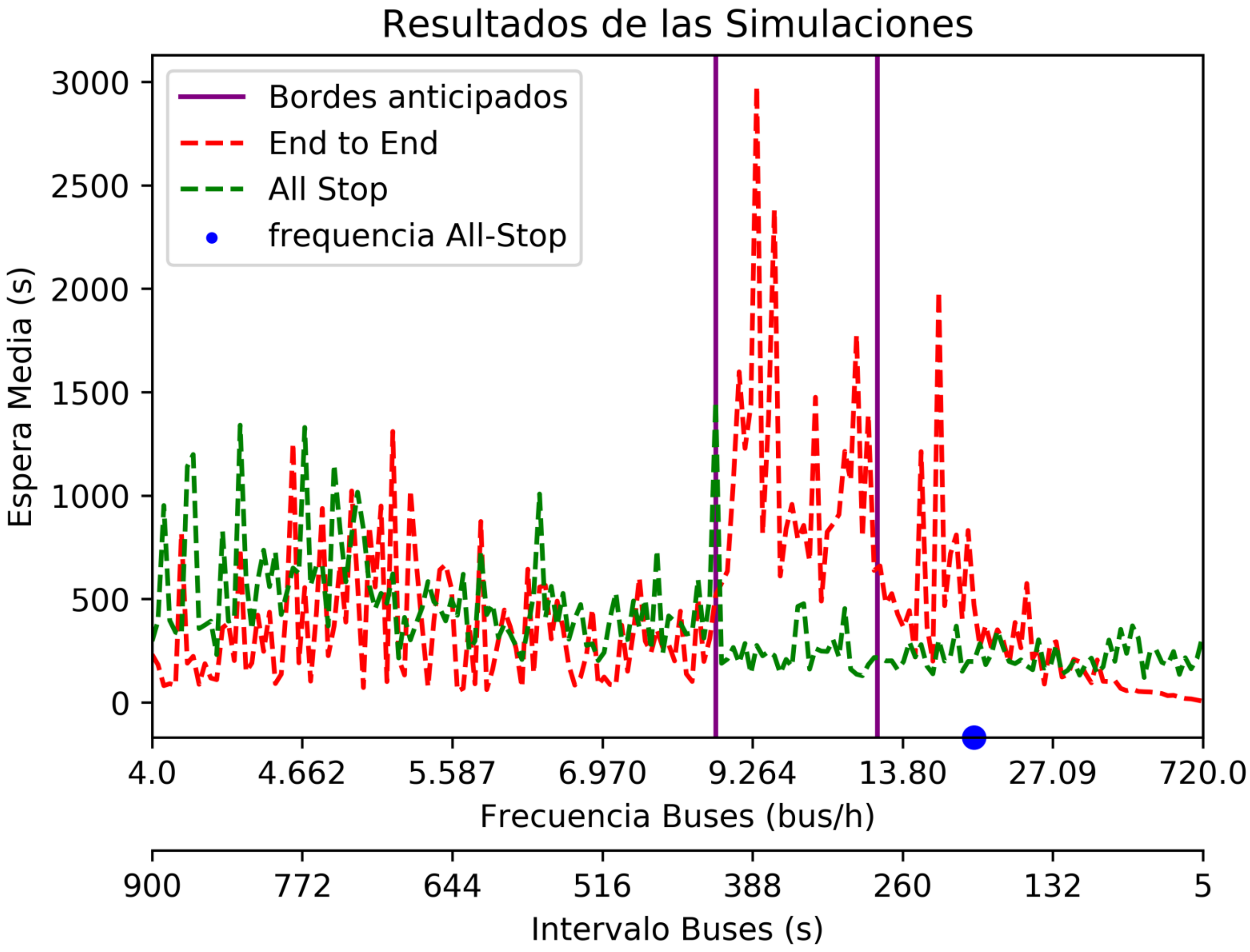


Este borde es la anticipación de la caída abrupta. Es lo que obtendríamos si el bus fuese infinito, es decir el resultado matemático esperado.

OTROS EXPERIMENTOS

Buses con llegadas Poisson

Buses con llegadas Poisson



Usuarios expertos y novatos

Hasta ahora el proceso de decisión de los usuarios no tenía error. ¿Qué pasa si una proporción de ellos “calcula mal”?

Usuarios expertos y novatos

Hasta ahora el proceso de decisión de los usuarios no tenía error. ¿Qué pasa si una proporción de ellos “calcula mal”?

Hay dos posibles errores:

- Calcular mal que bus tomar
- Dado que elijo el bus expreso, calcular mal si unirme o no a la fila de los expresos.

Usuarios expertos y novatos

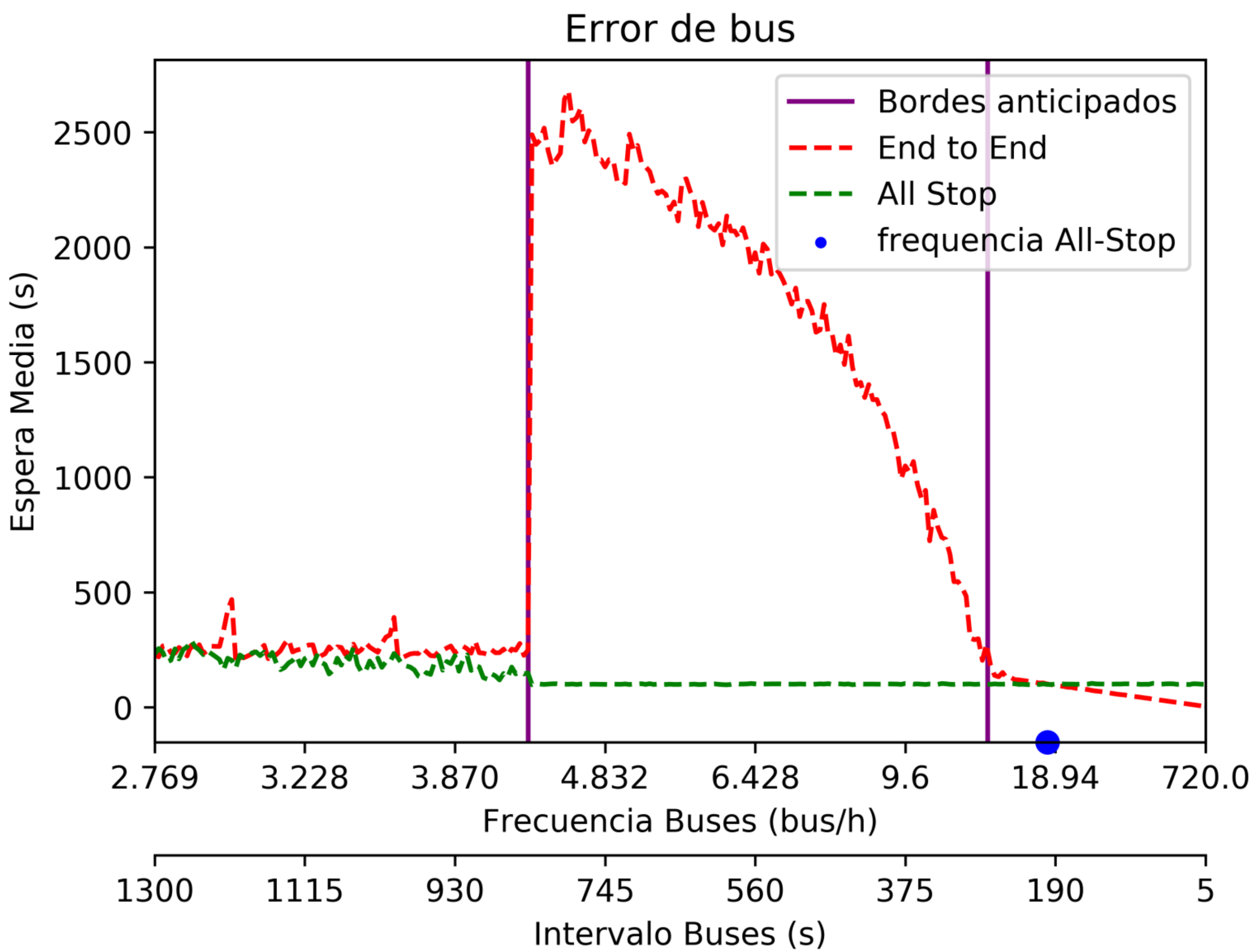
Hasta ahora el proceso de decisión de los usuarios no tenía error. ¿Qué pasa si una proporción de ellos “calcula mal”?

Hay dos posibles errores:

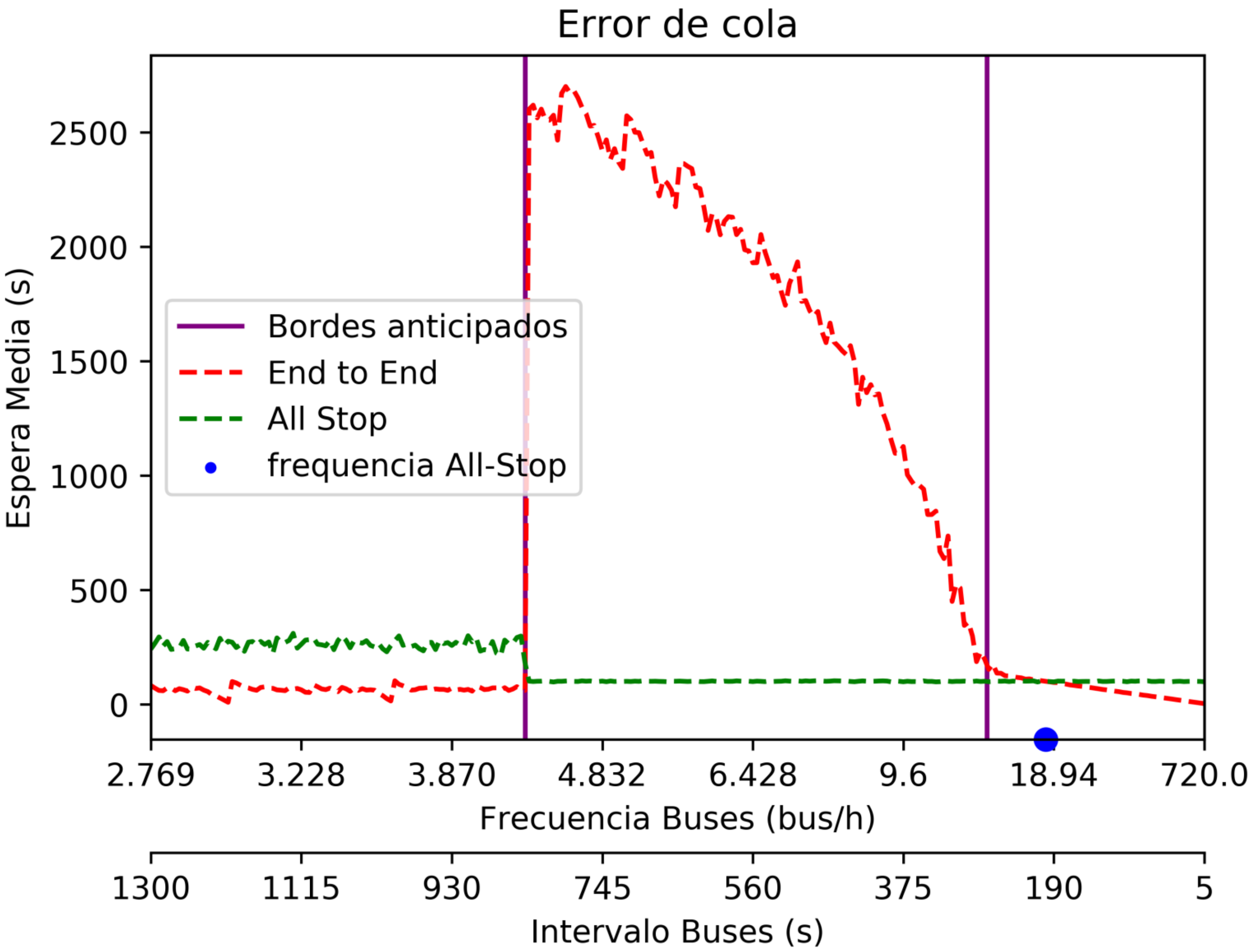
- Calcular mal que bus tomar
- Dado que elijo el bus expreso, calcular mal si unirme o no a la fila de los expresos.

Vamos a fijar un 20% de usuarios novatos.

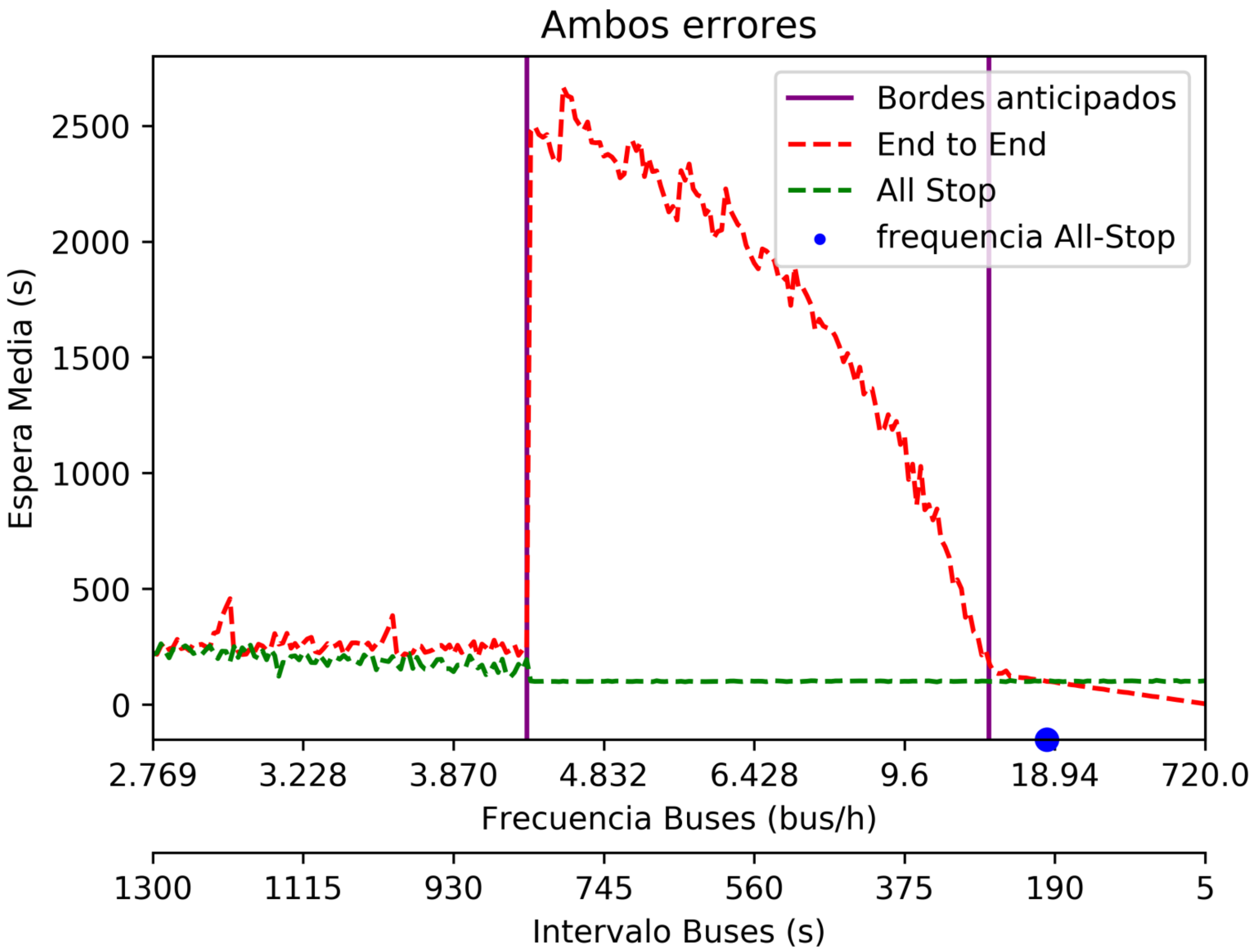
Usuarios expertos y novatos



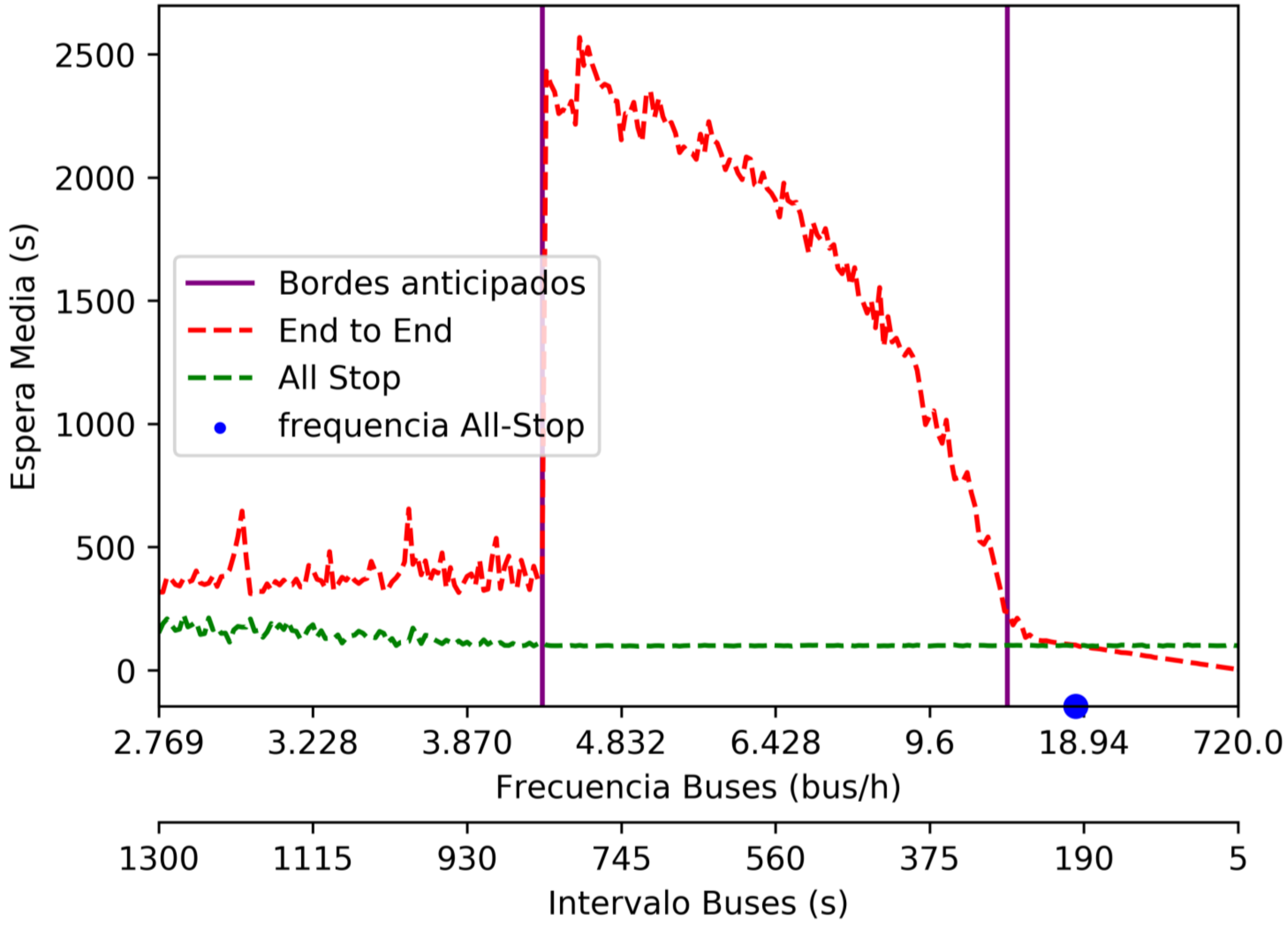
Usuarios expertos y novatos



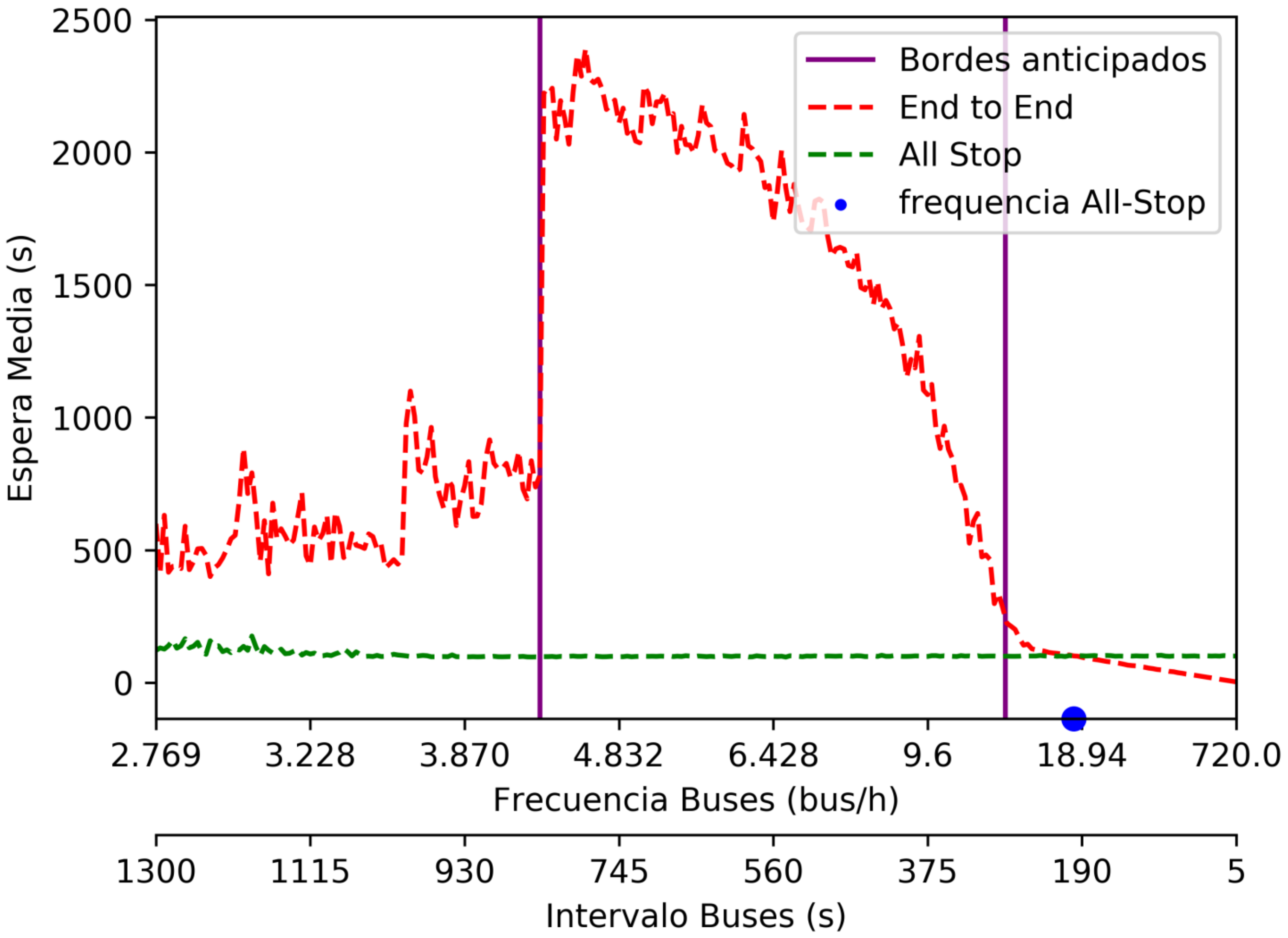
Usuarios expertos y novatos



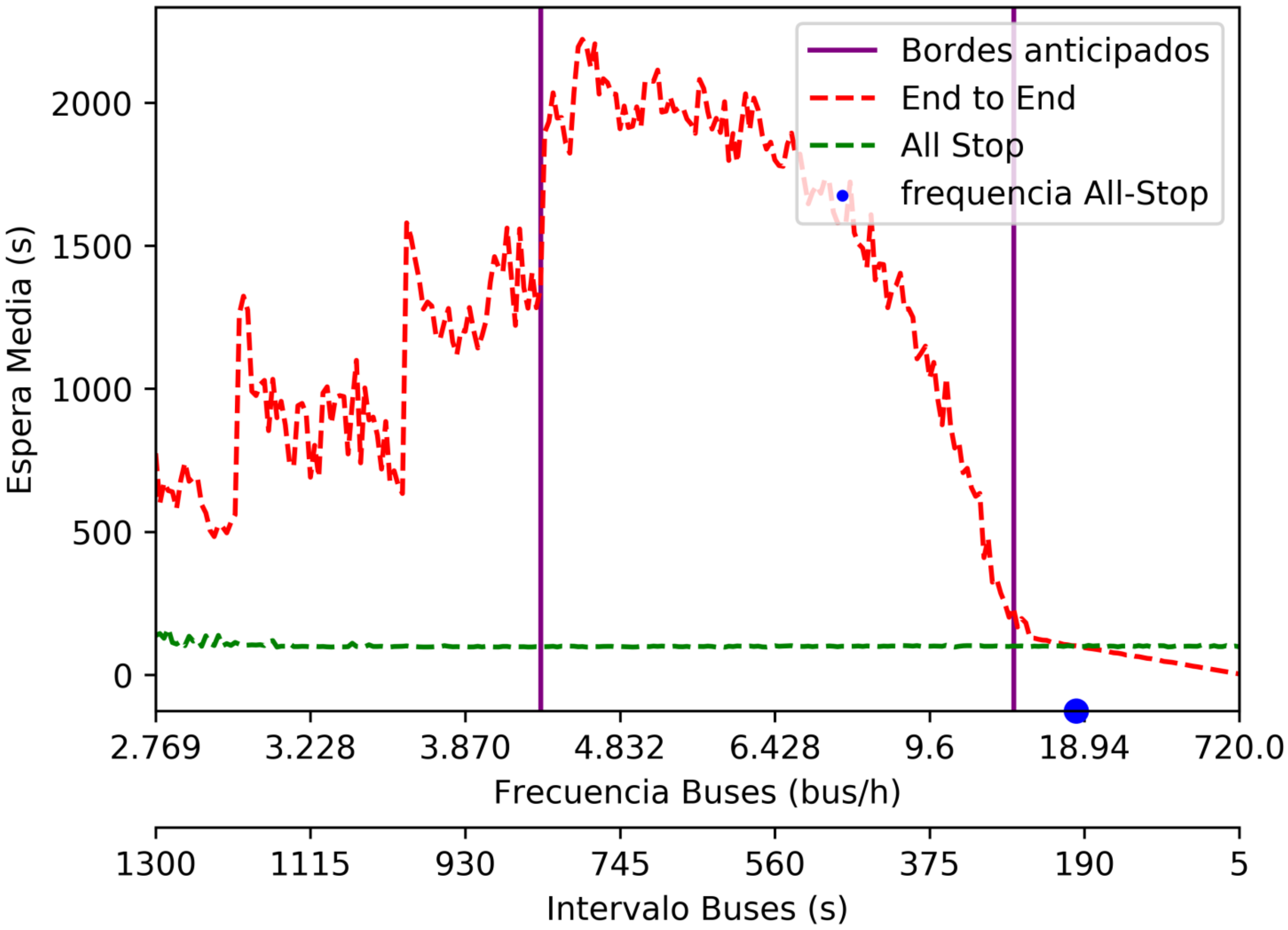
40% de novatos



60% de novatos



80% de novatos



CONCLUSIONES

Conclusiones:

- Podemos ver la existencia de la danger zone desde la simulación.
- Los bordes predichos calzan.

Pasos a seguir:

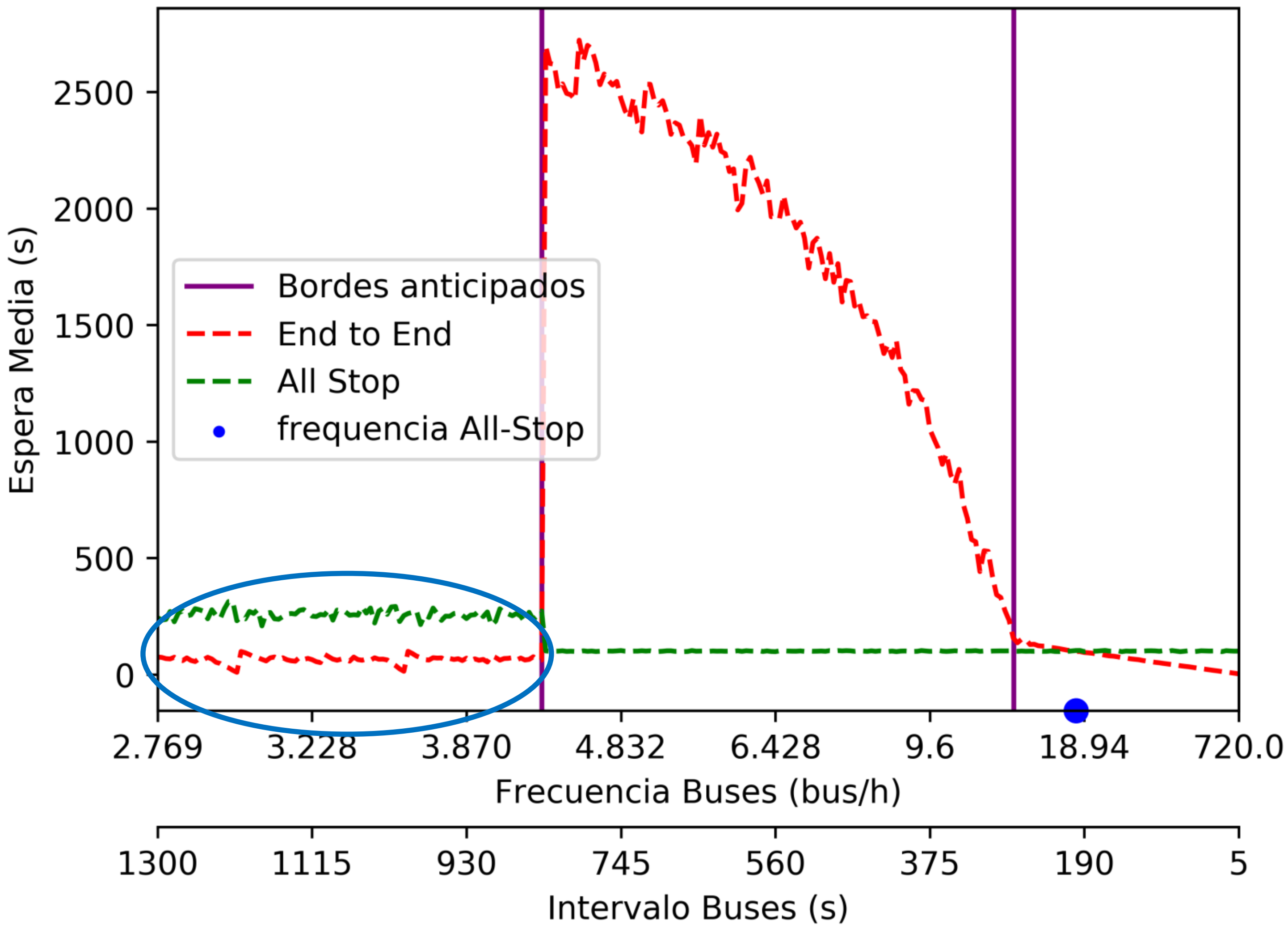
- Analizar un corredor en su conjunto.
- Verificar efecto de las capacidades de los buses.
- Establecer una forma matemática de encontrar una danger zone.

Comprendiendo la “*danger zone*” de los servicios expresos usando simulación

Homero Larraín, Juan Carlos Muñoz, Carlos Olivos

Pontificia Universidad Católica de Chile

¿Resonancia?



Bordes anticipados
End to End
All Stop
frequencia All-Stop
Espera Media (s)
2500
2000
1500
1000
500
0
2.769
3.228
3.870
4.832
6.428
9.6
18.94
720.0
Frecuencia Buses (bus/h)
1300
1115
930
745
560
375
190
5
Intervalo Buses (s)

¿Resonancia?