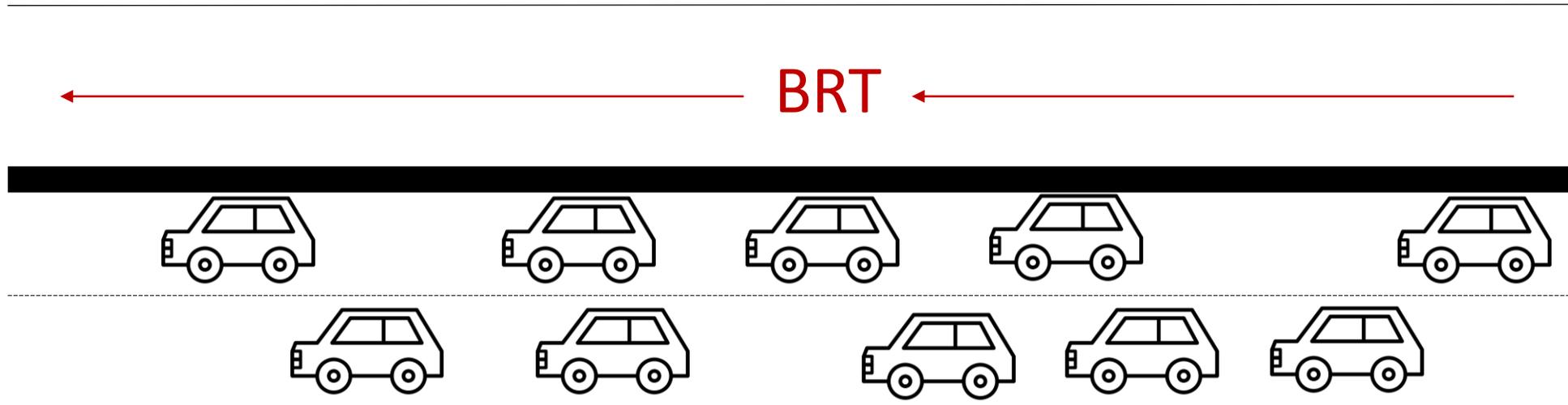


# Extendiendo la *Danger Zone* de los servicios expresos con simulación

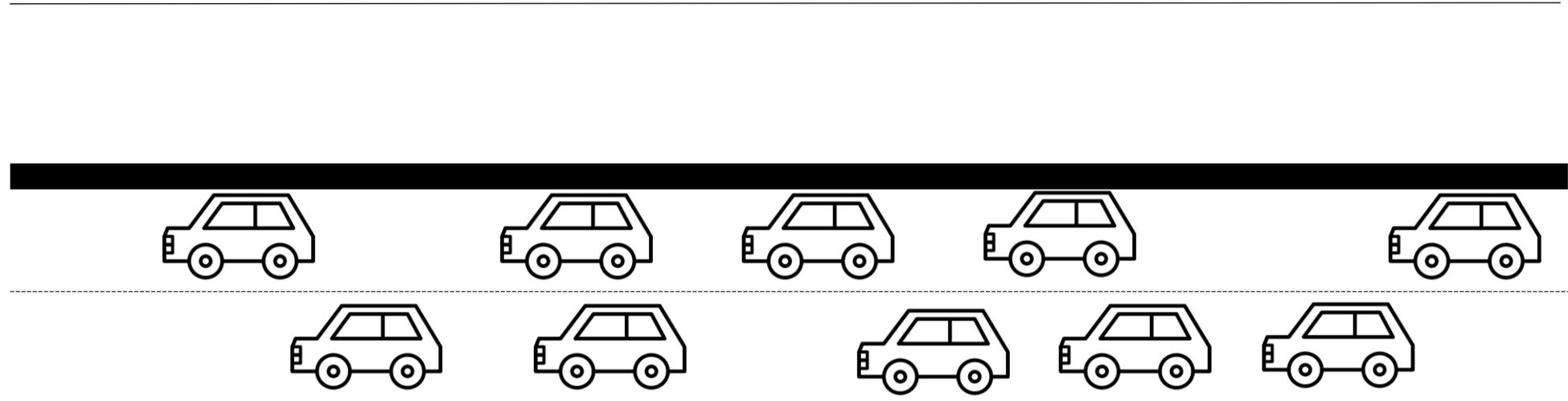
Presentación Seminario DITL

# **Parte 1:** la *Danger Zone* de los servicios expresos

Imaginemos un BRT  
donde los viajes son  
en un sentido:

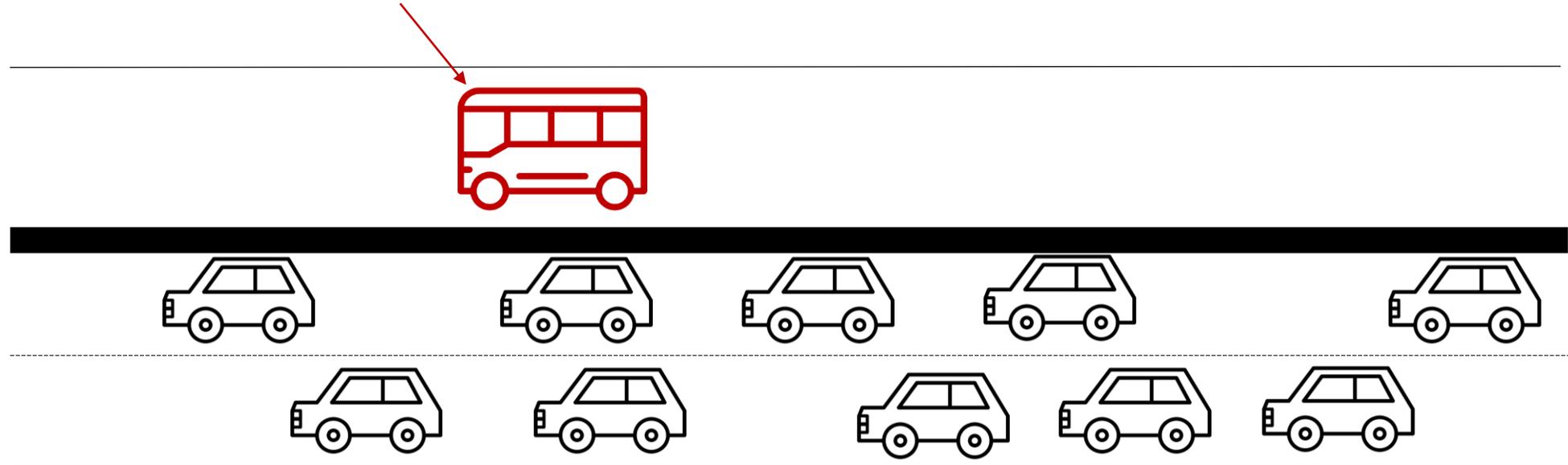


En este BRT hay dos tipos de bus: expreso y *all-stop*



En este BRT hay dos tipos de bus: expreso y *all-stop*

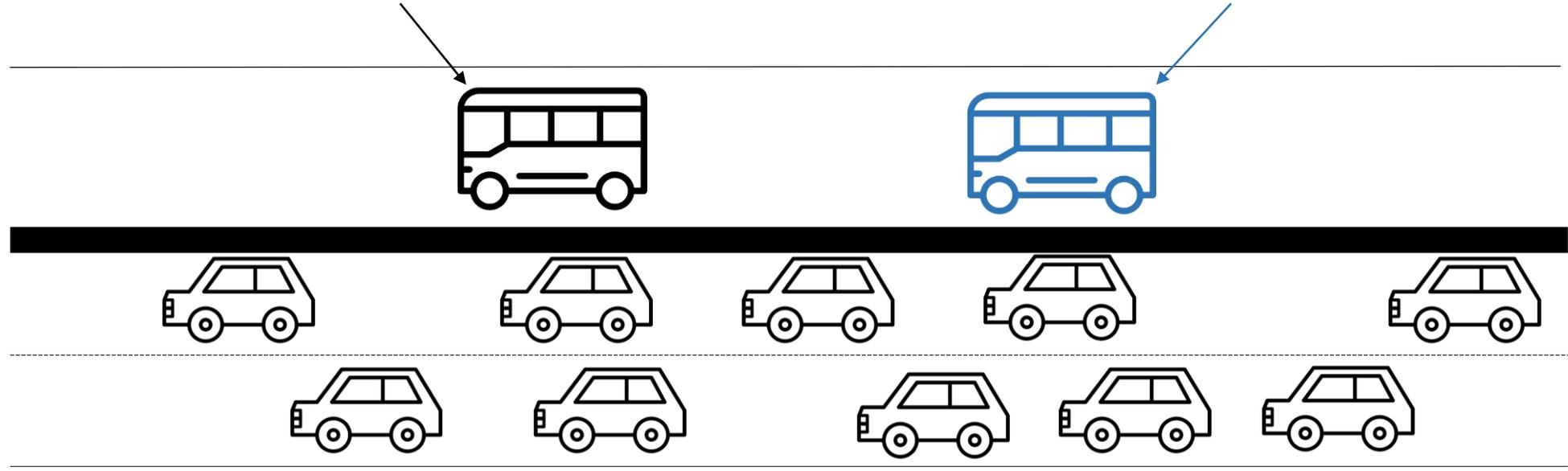
Bus expreso



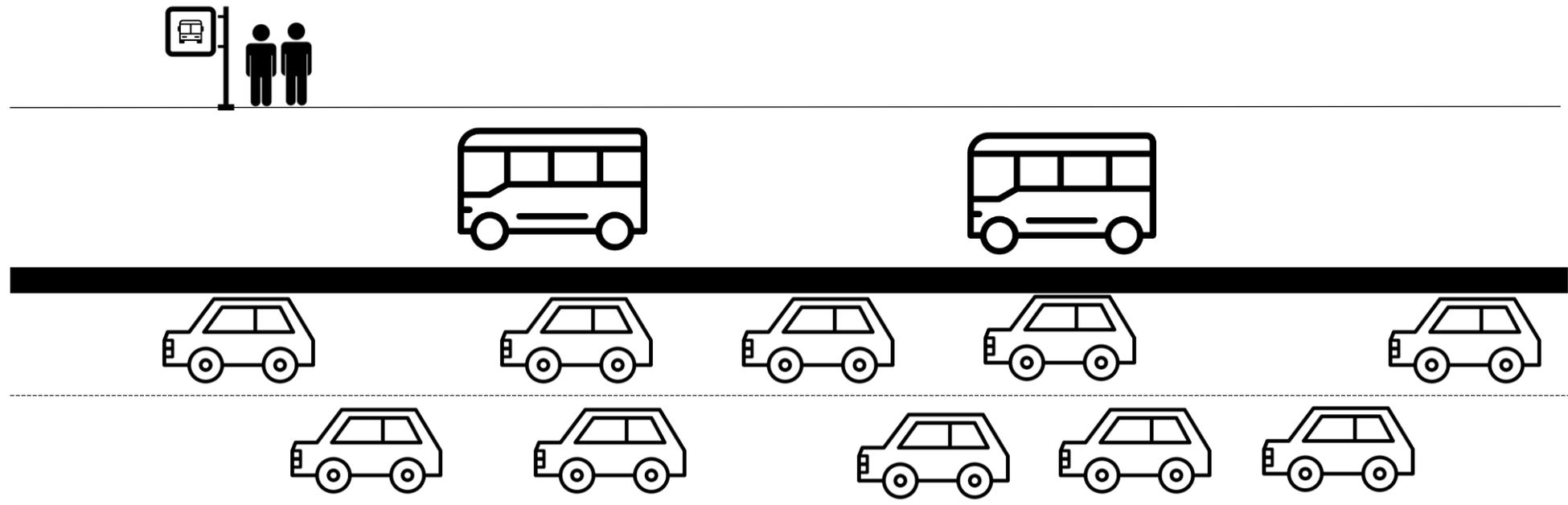
En este BRT hay dos tipos de bus: expreso y *all-stop*

Bus expreso

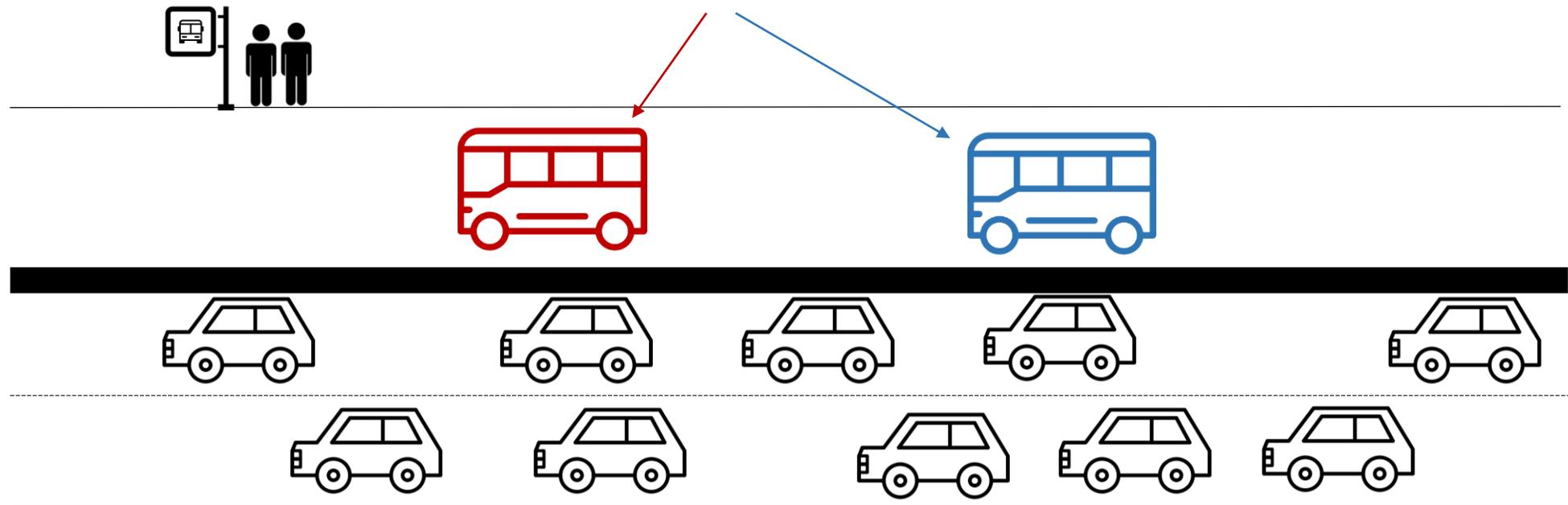
Bus *all-stop*



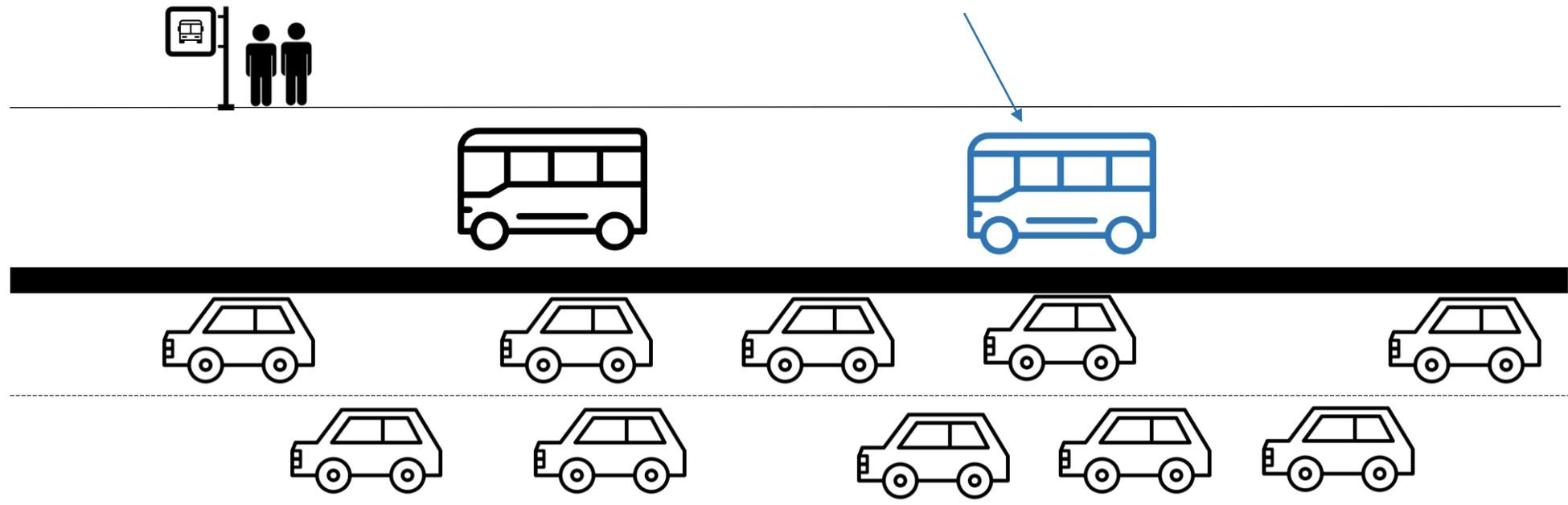
En este BRT hay  
paraderos. A ellos  
llegan usuarios  
flexibles y cautivos.



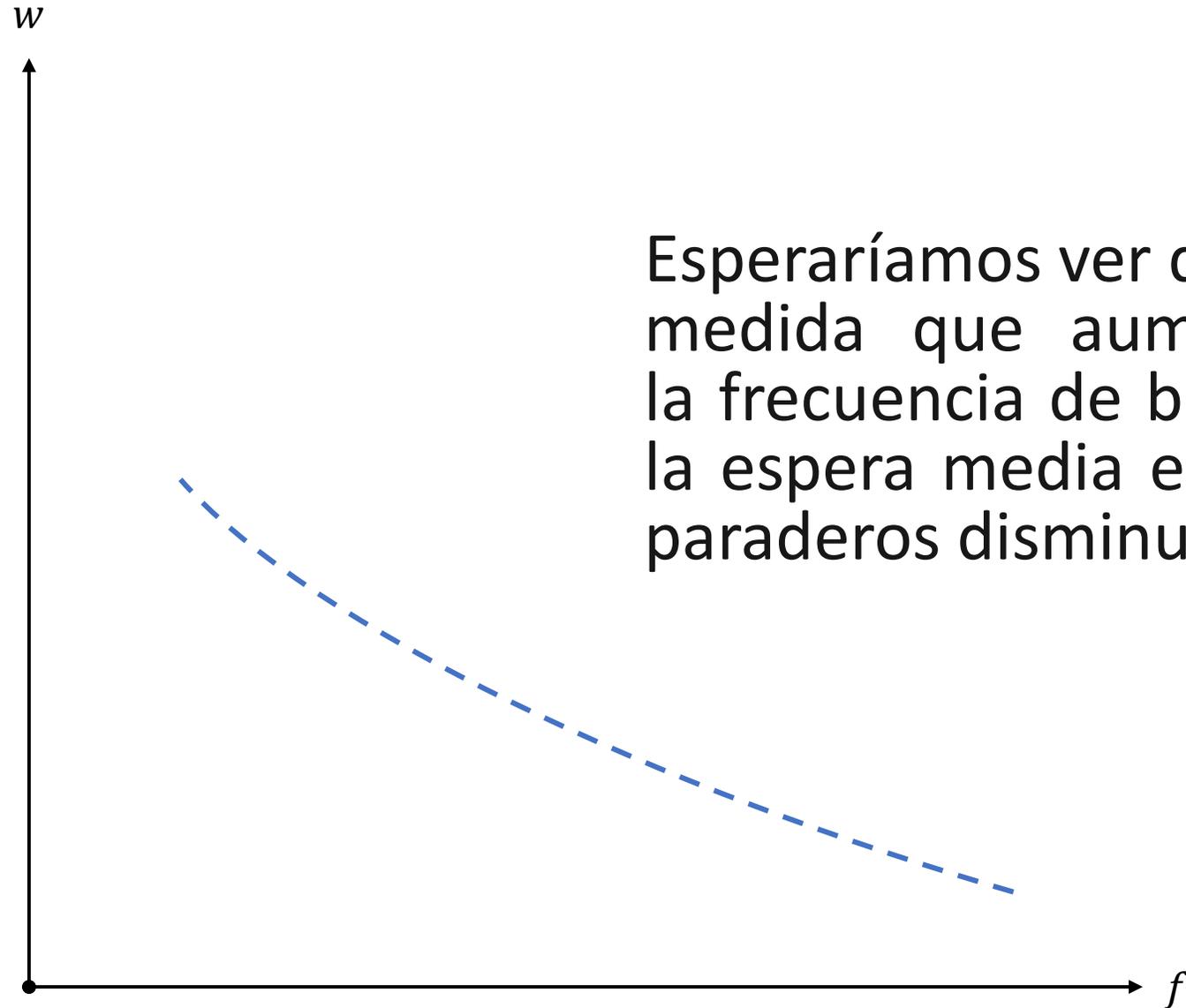
En este BRT hay paraderos. A ellos llegan usuarios flexibles y cautivos.



En este BRT hay paraderos. A ellos llegan usuarios flexibles y **cautivos**.

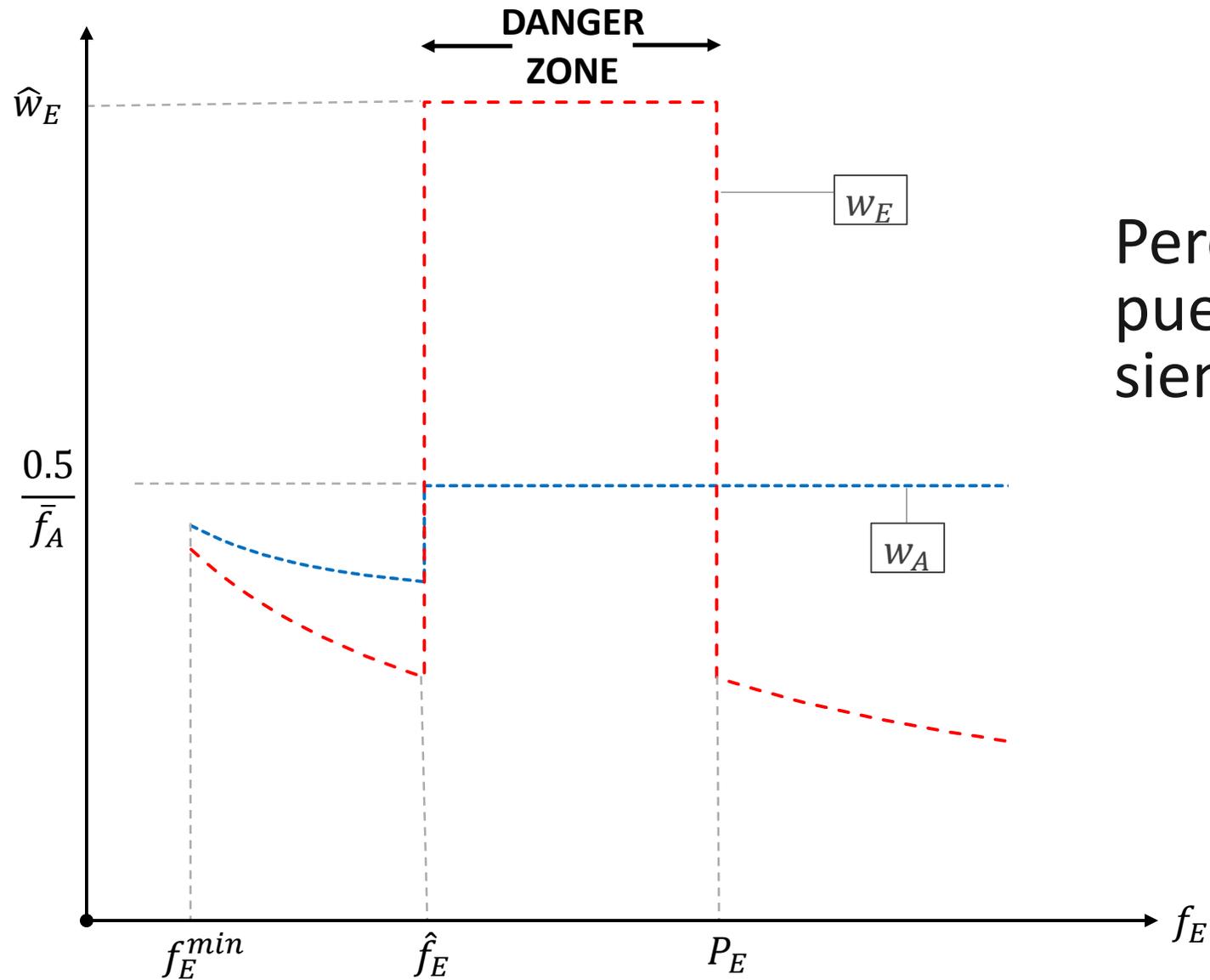


# Tiempo promedio de espera



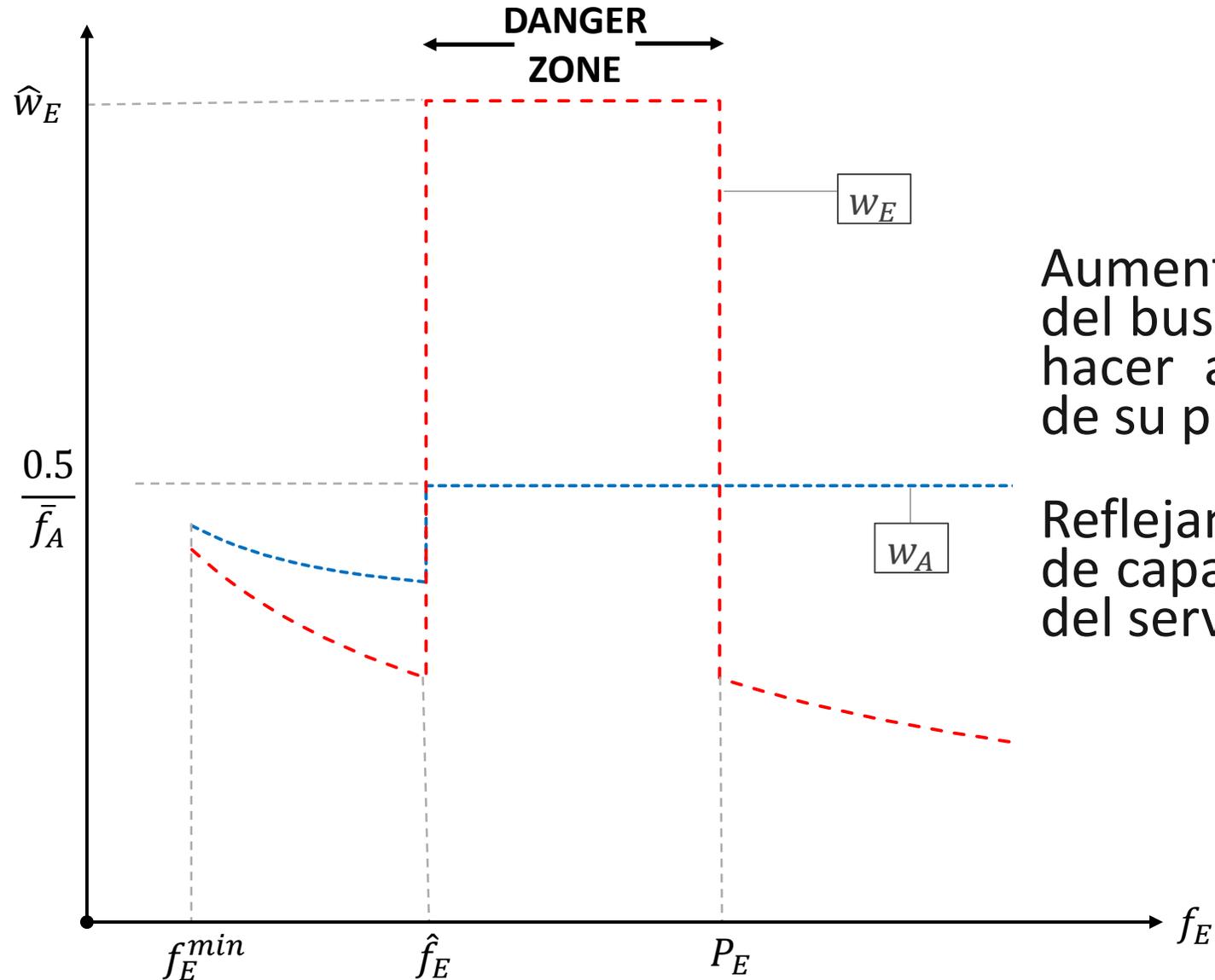
Esperaríamos ver que a medida que aumenta la frecuencia de buses, la espera media en los paraderos disminuye.

# Tiempo promedio de espera



Pero esto puede no ser siempre así...

# Tiempo promedio de espera



Aumentar la frecuencia del bus expreso, se puede hacer al servicio víctima de su propio éxito.

Reflejando un problema de capacidad vs demanda del servicio.

Los usuarios flexibles eligen tomar el primer bus que pasa, o esperar exclusivamente al bus expreso. Matemáticamente:

Los usuarios flexibles eligen tomar el primer bus que pasa, o esperar exclusivamente al bus expreso. Matemáticamente:

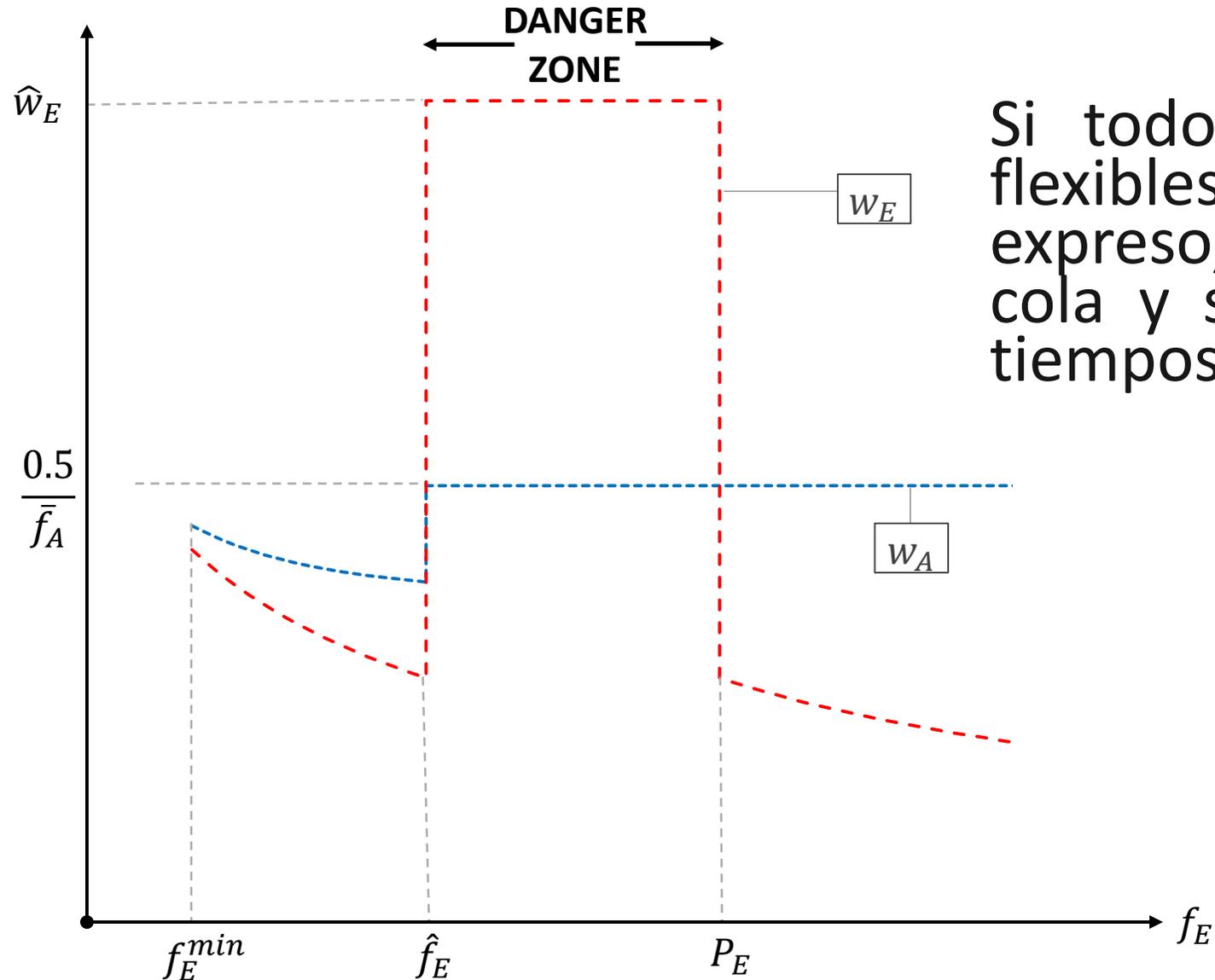
$$C_{\{A,E\}} = \frac{f_A t_A + f_E t_E + 0.5}{f_A + f_E} \quad \text{O} \quad C_{\{E\}} = t_E + \frac{0.5}{f_E}$$

Los usuarios flexibles eligen tomar el primer bus que pasa, o esperar exclusivamente al bus expreso. Matemáticamente:

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

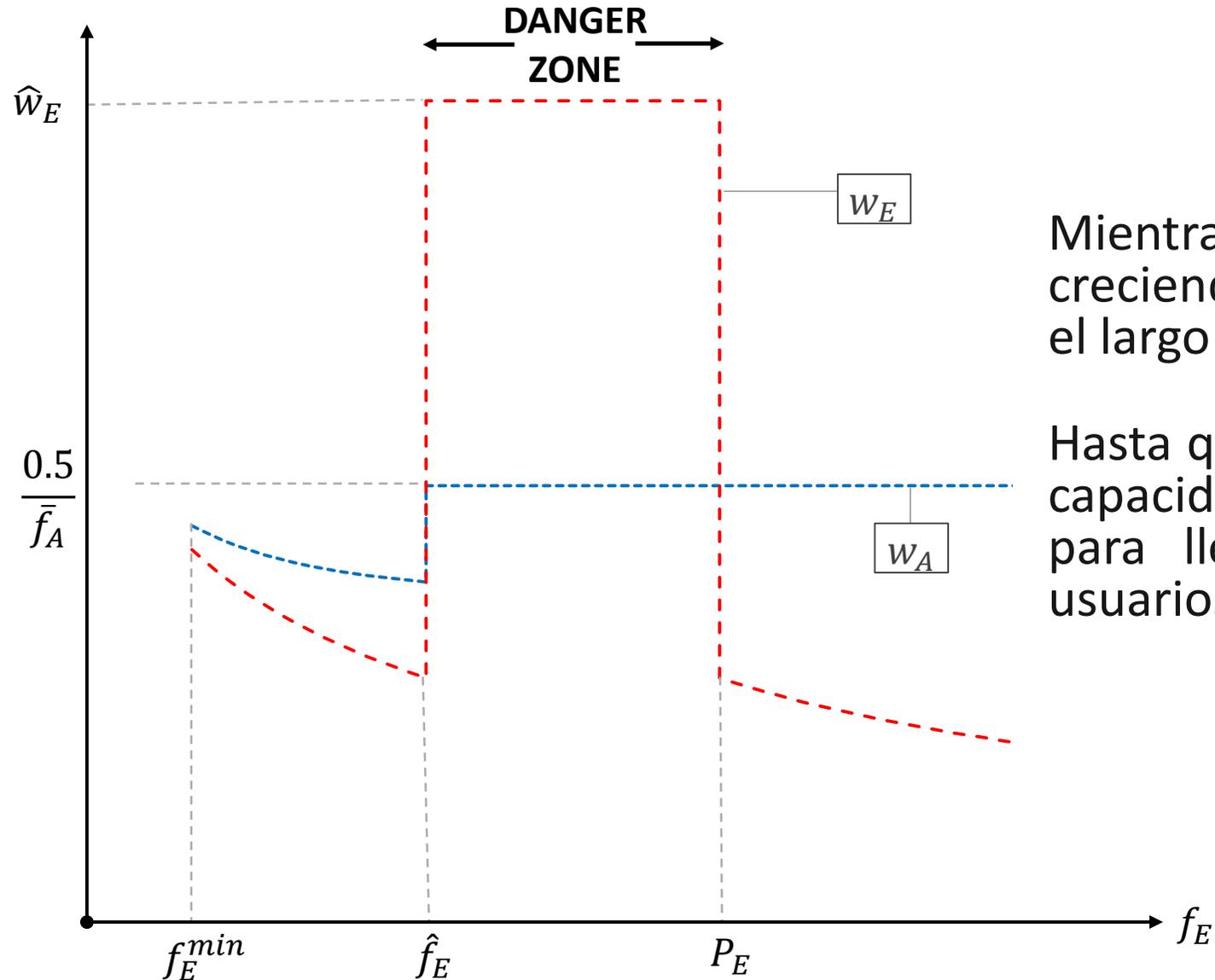
Para  $f_A$  fija, si  $f_E$  es baja tiene menor costo la ecuación de la izquierda. Si es alta, tiene menor costo la de la derecha. Esto implica que a partir de una  $f_E$  particular, a todos los usuarios flexibles sólo les va a convenir esperar al bus expreso.

# Tiempo promedio de espera



Si todos los usuarios flexibles esperan al bus expreso, se forma una cola y se disparan los tiempos de espera.

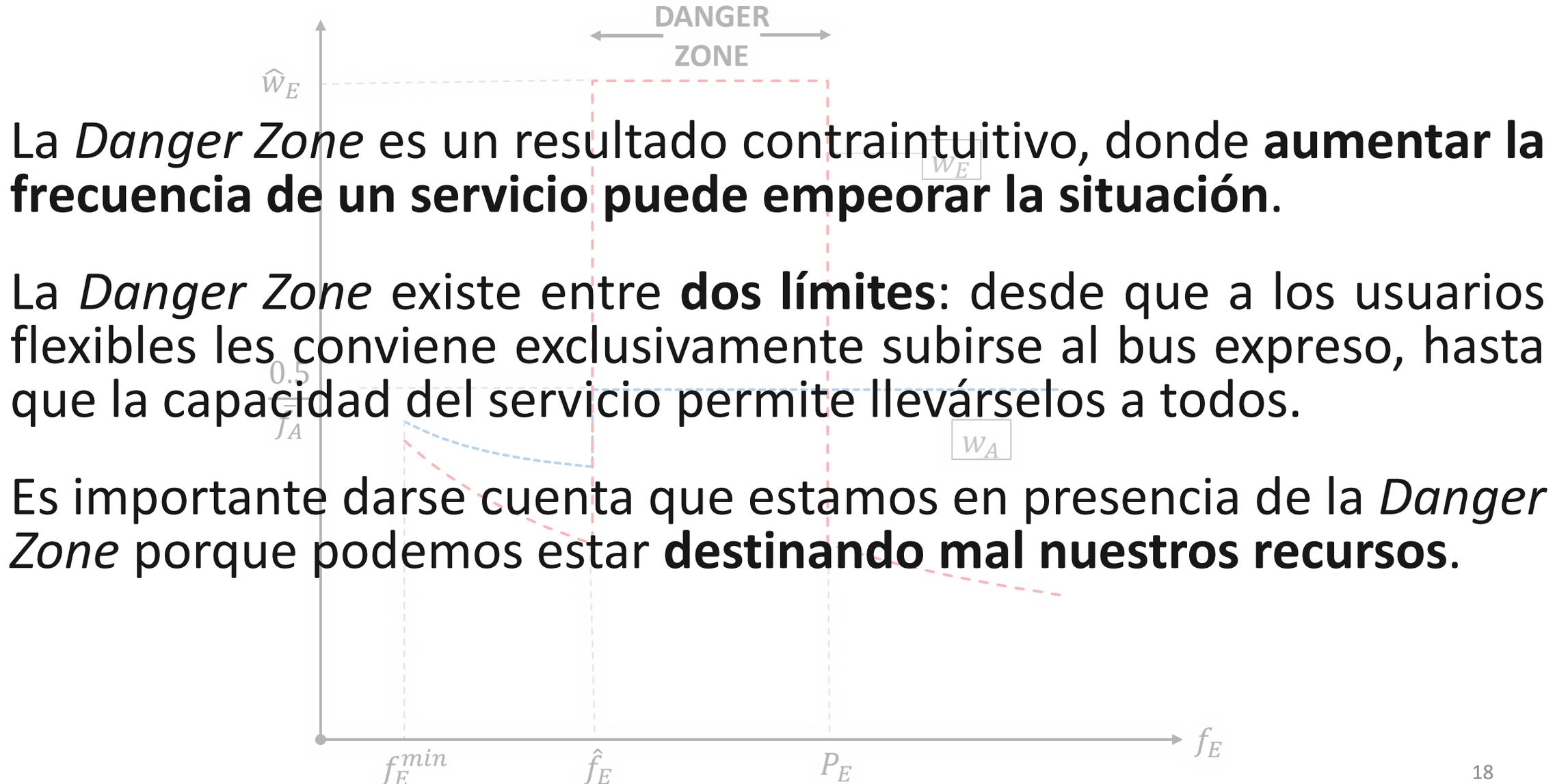
# Tiempo promedio de espera



Mientras la frecuencia siga creciendo, también lo hará el largo máximo de la cola.

Hasta que eventualmente la capacidad sea suficiente para llevarse a todos los usuarios flexibles.

# Resumen



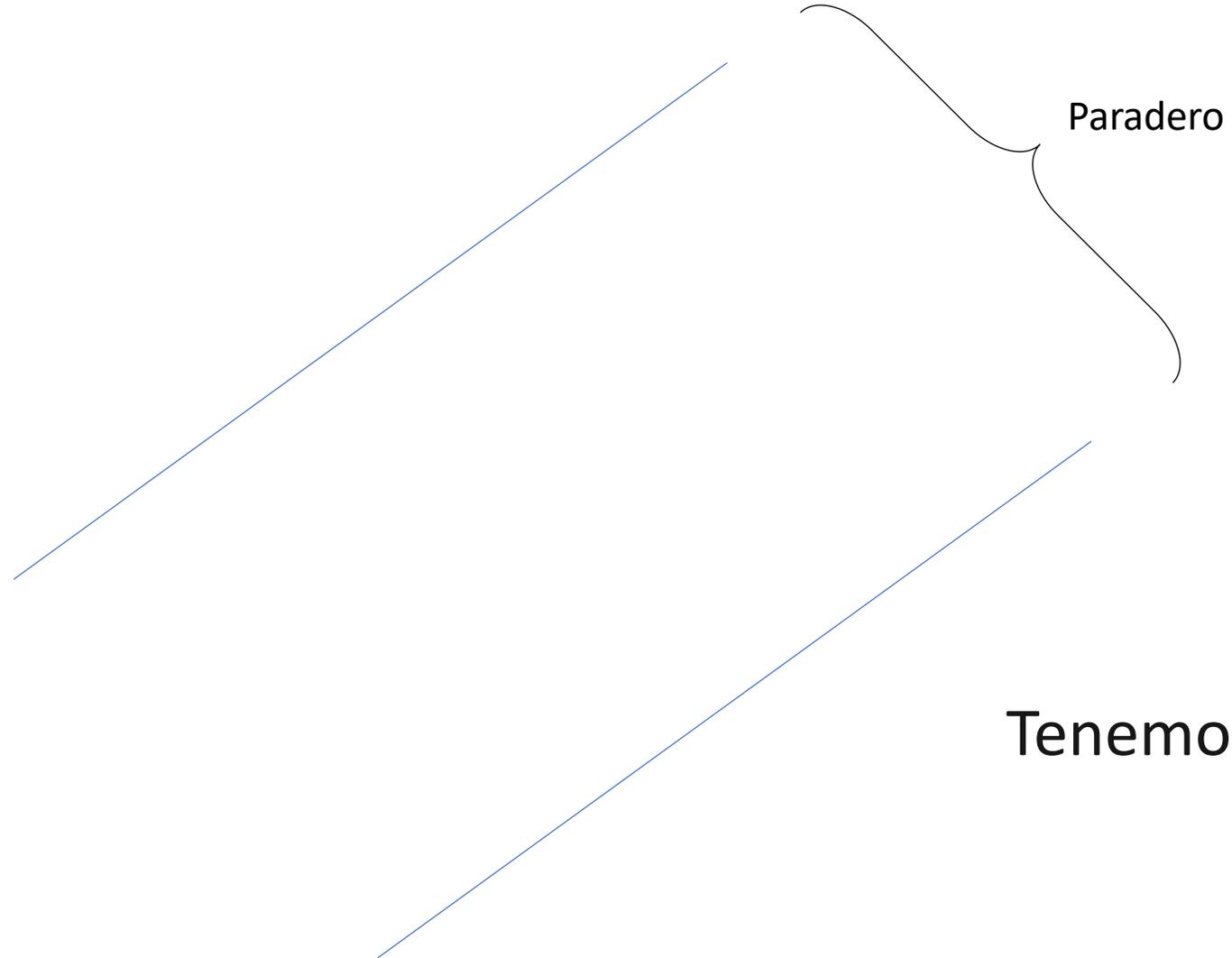
La *Danger Zone* es un resultado contraintuitivo, donde **aumentar la frecuencia de un servicio puede empeorar la situación.**

La *Danger Zone* existe entre **dos límites**: desde que a los usuarios flexibles les conviene exclusivamente subirse al bus expreso, hasta que la capacidad del servicio permite llevárselos a todos.

Es importante darse cuenta que estamos en presencia de la *Danger Zone* porque podemos estar **destinando mal nuestros recursos.**

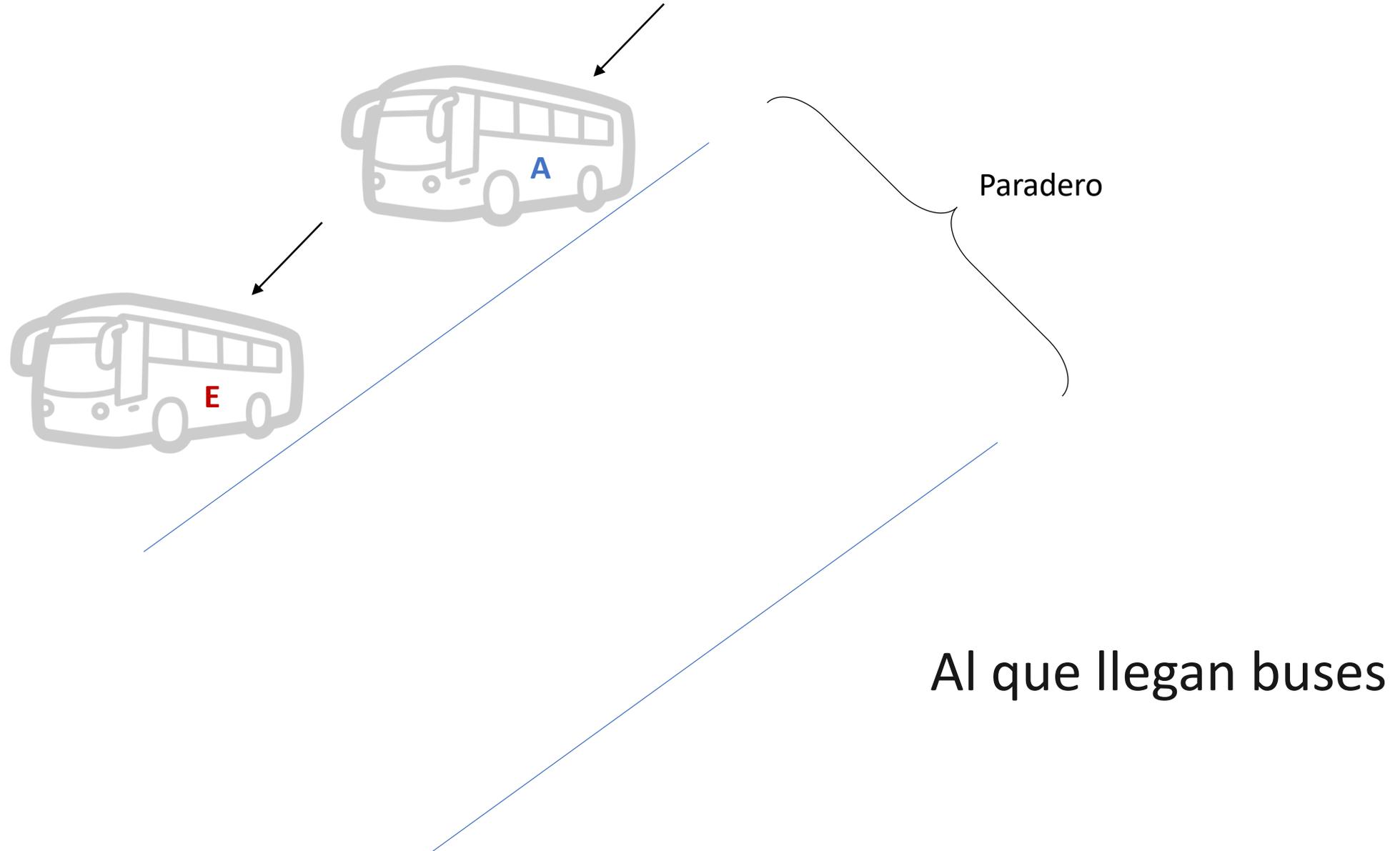
## **Parte 2:** simulando la *Danger Zone* de los servicios expresos

# Construyendo una simulación modular:

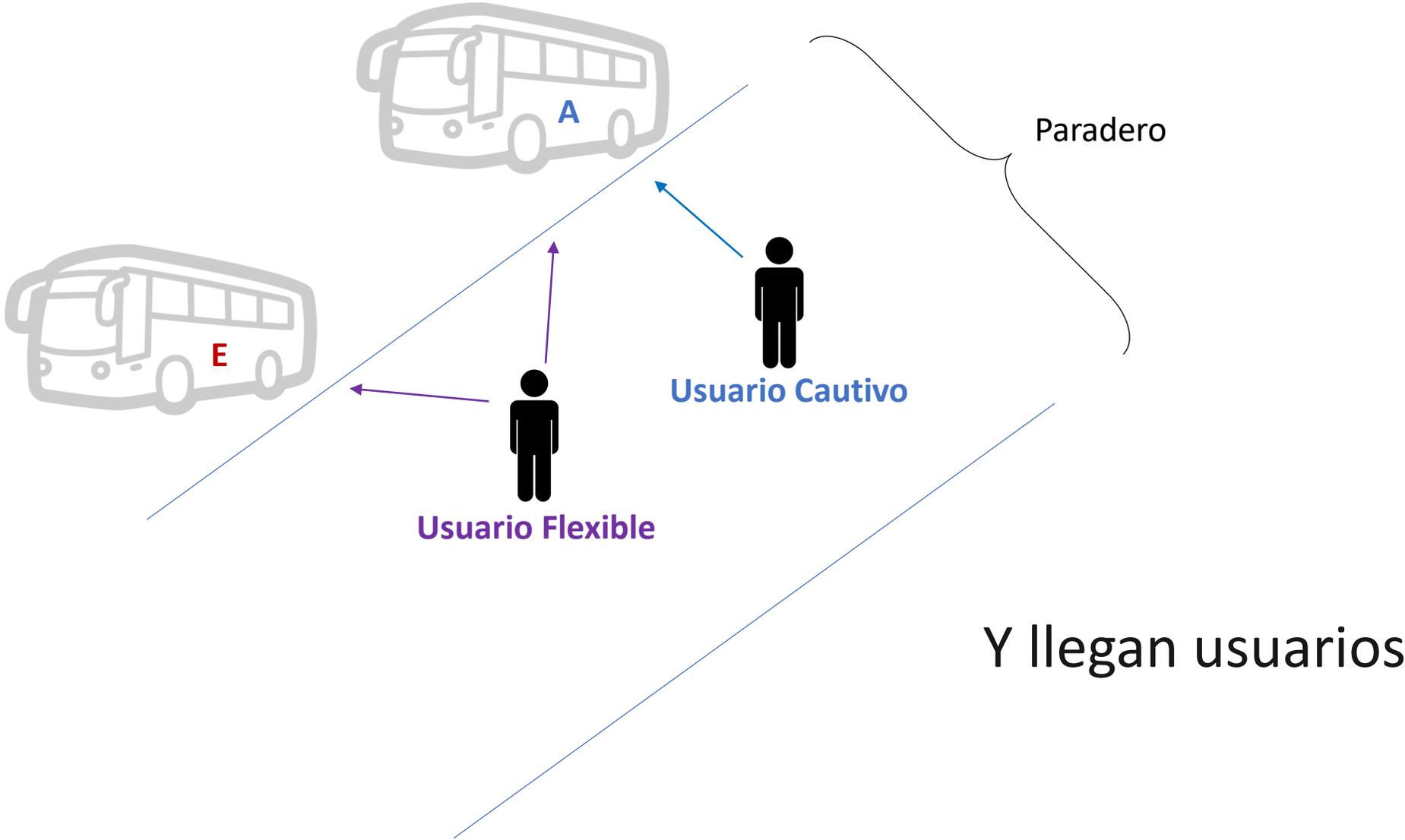


Tenemos un paradero

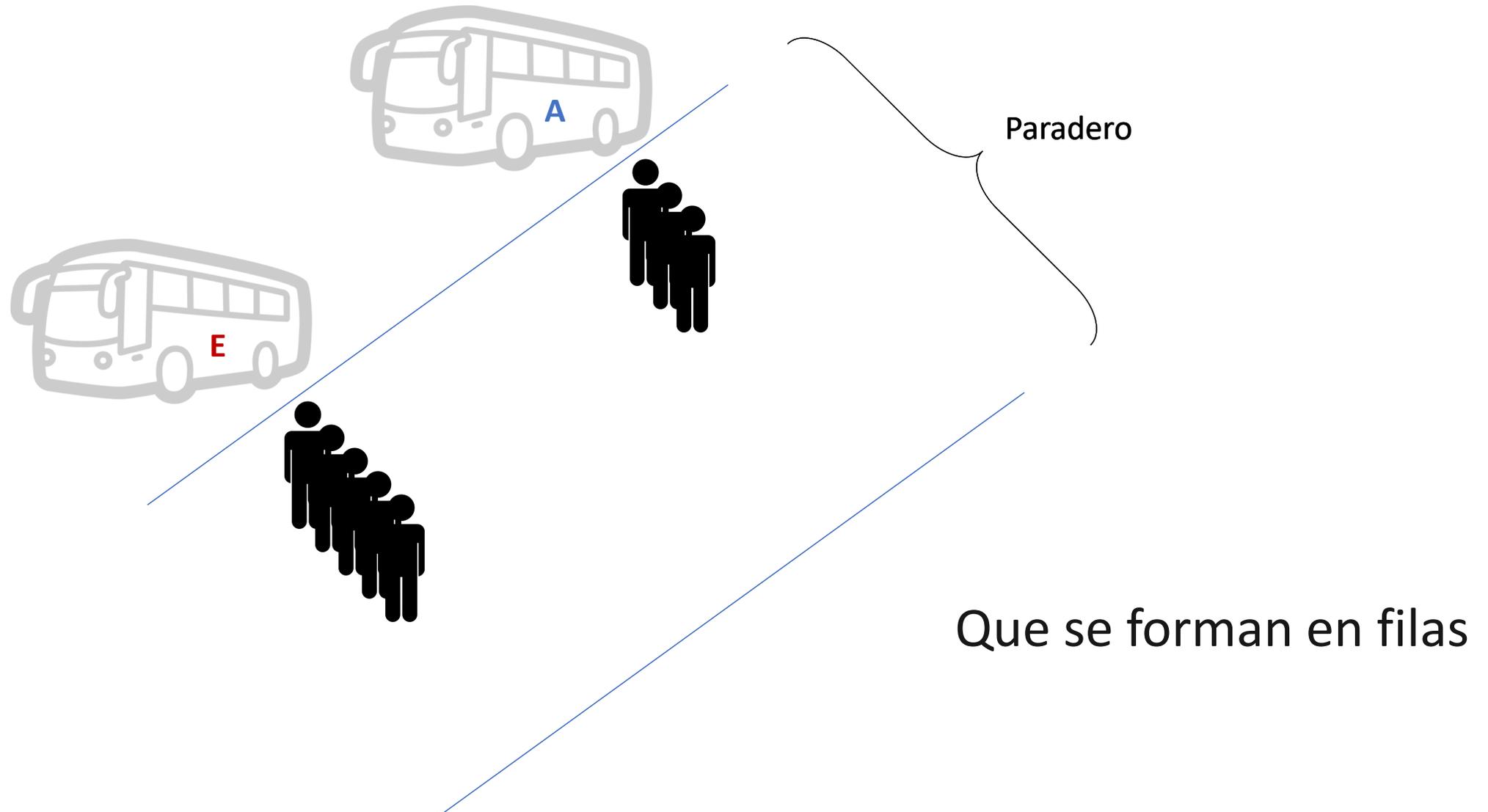
# Construyendo una simulación modular:



# Construyendo una simulación modular:



# Construyendo una simulación modular:



# Diferencia



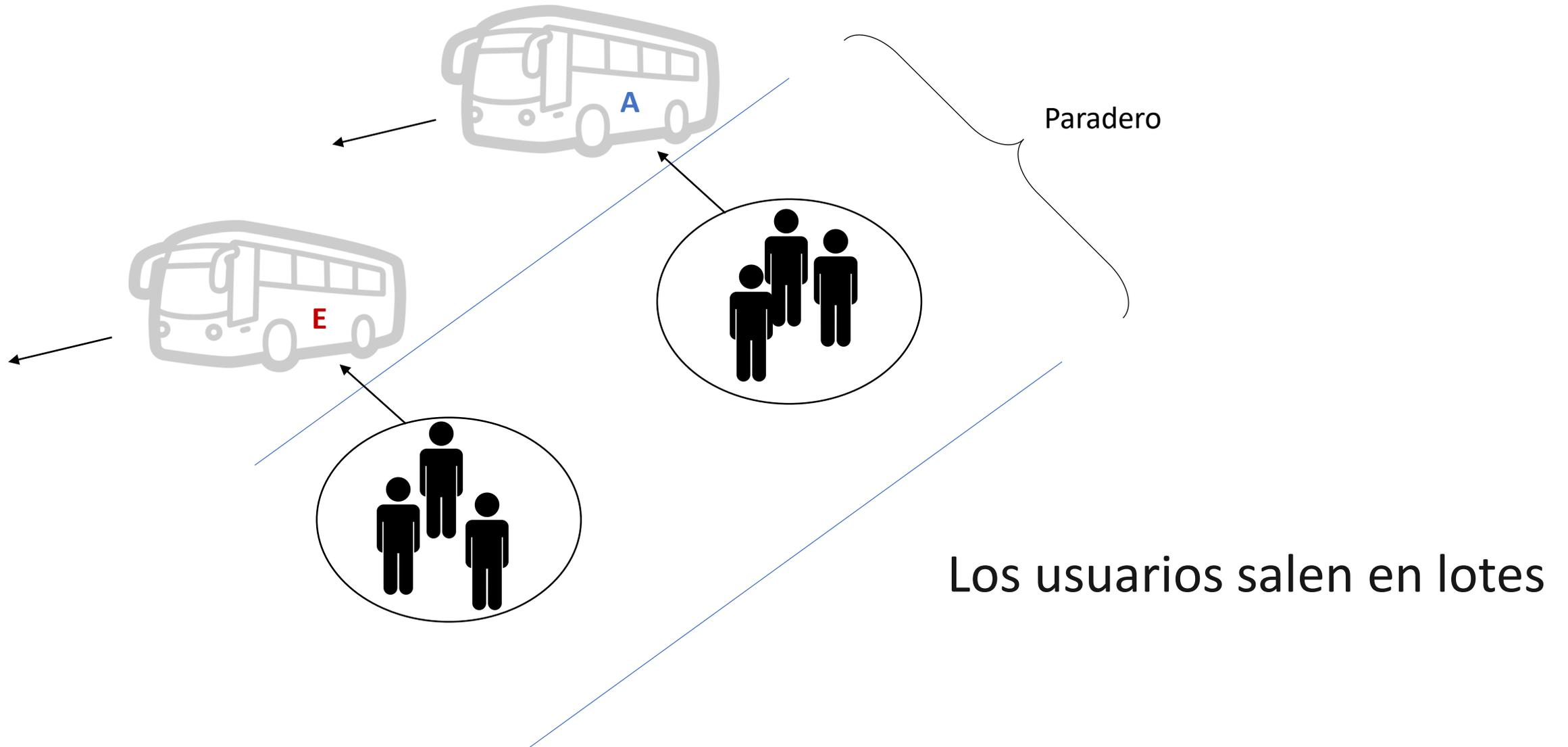
## Paper

El proceso de salida de usuarios es continuo.

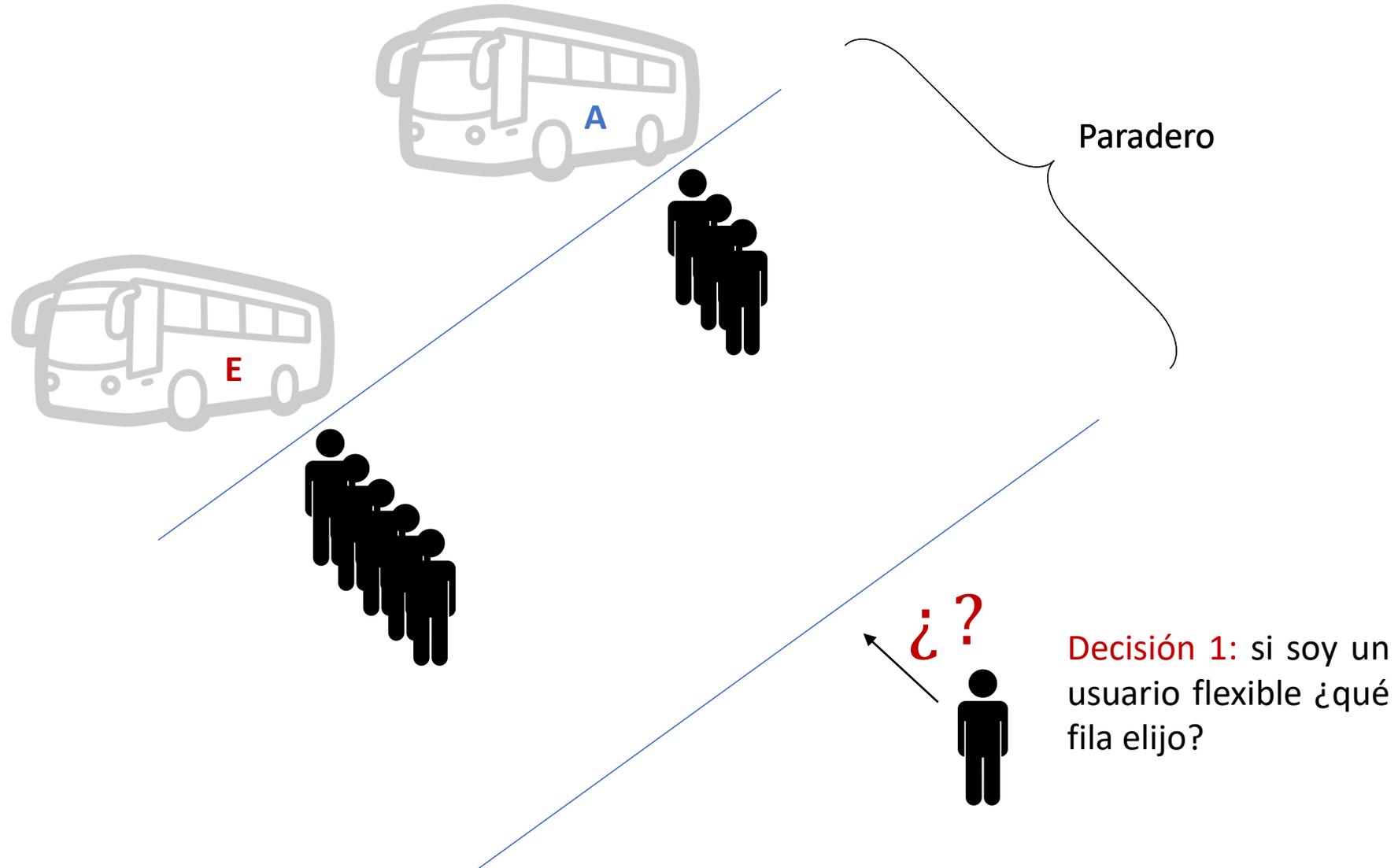
## Simulación

El proceso de salida de usuarios en el lotes.

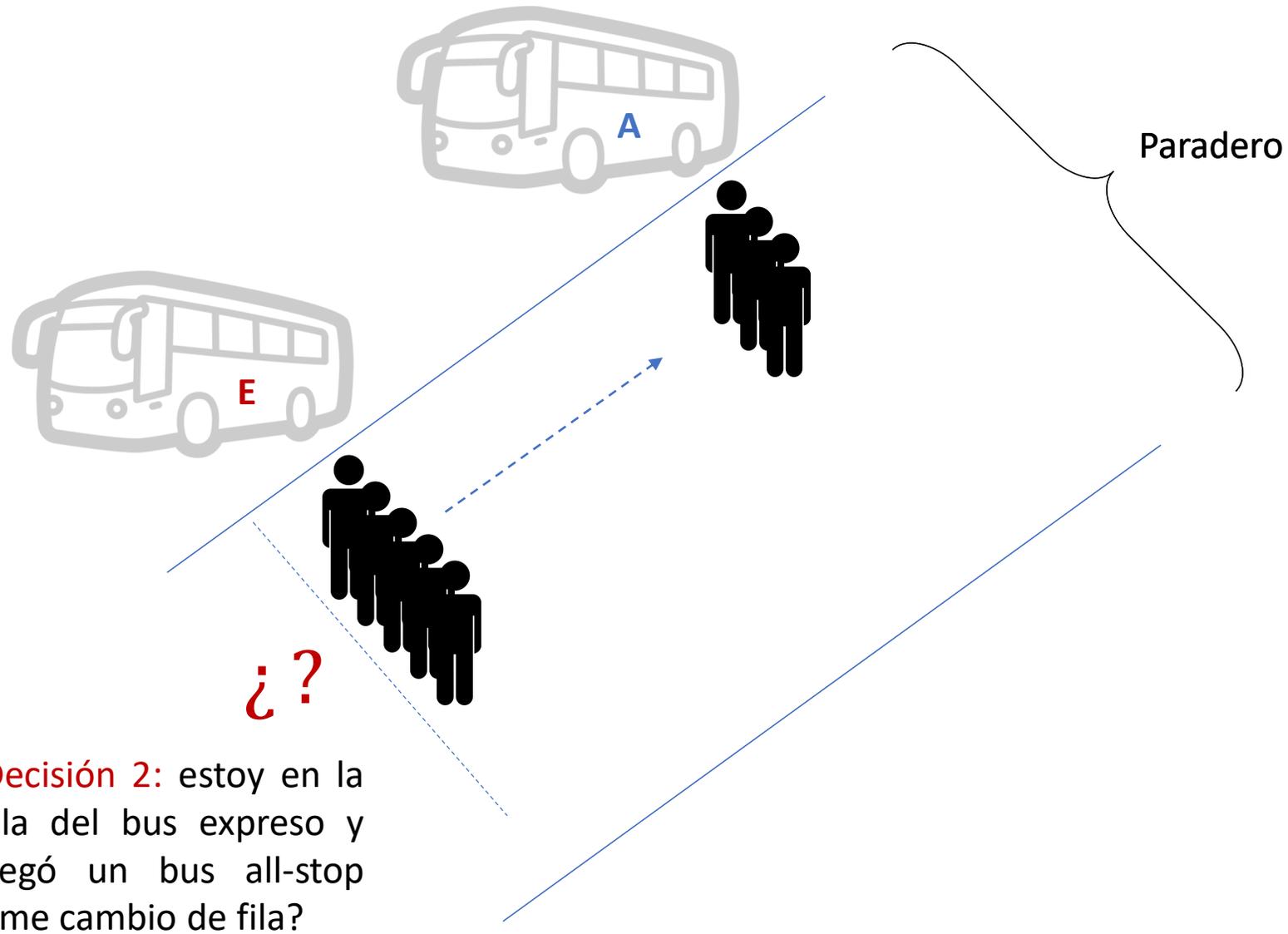
# Construyendo una simulación modular:



# Construyendo una simulación modular:



# Construyendo una simulación modular:



# Modelo de comportamiento:

**Decisión 1:** si soy un usuario flexible ¿qué fila elijo?

**Decisión 2:** estoy en la fila A y llegó un bus del tipo B ¿me cambio de fila?



Cualquiera sea la situación a la que se enfrenta un usuario, su decisión la tomará **comparando tiempos esperados de viaje.**



# Modelo de comportamiento:

**Decisión 1:** si soy un usuario flexible ¿qué fila elijo?

**Decisión 2:** estoy en la fila A y llegó un bus del tipo B ¿me cambio de fila?



Cualquiera sea la situación a la que se enfrenta un usuario, su decisión la tomará **comparando tiempos esperados de viaje.**

Los tiempos esperados de viaje incluyen tiempo de viaje en vehículo y tiempo de espera en cola.

La función con la que se modela el cálculo de los tiempos esperados puede variar.



## **Parte 3:** validando la *Danger Zone* de los servicios expresos

# Supuestos del experimento de validación

1. **Las decisiones en las filas se toman de adelante hacia atrás.** Esto implica que el primer usuario en decidir es el que está más adelante en la fila. Otras opciones podrían ser de atrás hacia adelante o de forma aleatoria.
2. **Los usuarios no pueden determinar cuando va a pasar un bus en función del nivel de llenado de la fila.** Si la fila está vacía, un usuario podría concluir que el bus acaba de pasar, esto no lo puede hacer en la simulación del experimento de validación. Sólo puede estimar utilizando frecuencias de buses.
3. **Los buses y las personas llegan al paradero en intervalos regulares.**
4. **Ningún usuario posee una app que le permita saber cuando llega el siguiente bus exactamente.**

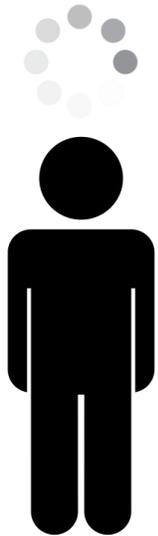
# Supuestos del experimento de validación

1. **Las decisiones en las filas se toman de adelante hacia atrás.** Esto implica que el primer usuario en decidir es el que está más adelante en la fila. Otras opciones podrían ser de atrás hacia adelante o de forma aleatoria.
2. **Los usuarios no pueden determinar cuando va a pasar un bus en función del nivel de llenado de la fila.** Si la fila está vacía, un usuario podría concluir que el bus acaba de pasar, esto no lo puede hacer en la simulación del experimento de validación. Sólo puede estimar utilizando frecuencias de buses.
3. **Los buses y las personas llegan al paradero en intervalos regulares.**
4. **Ningún usuario posee una app que le permita saber cuando llega el siguiente bus exactamente.**

## Parámetros:

- **Tiempo de estudio:** 7200 segundos.
- **Frecuencia bus all-stop:** 1 bus cada 120 segundos.
- **Usuarios flexibles:** 1800 por hora.
- **Usuarios cautivos:** 900 por hora.
- **Ahorro de tiempo bus expreso:** 10 minutos.

# Decisiones:



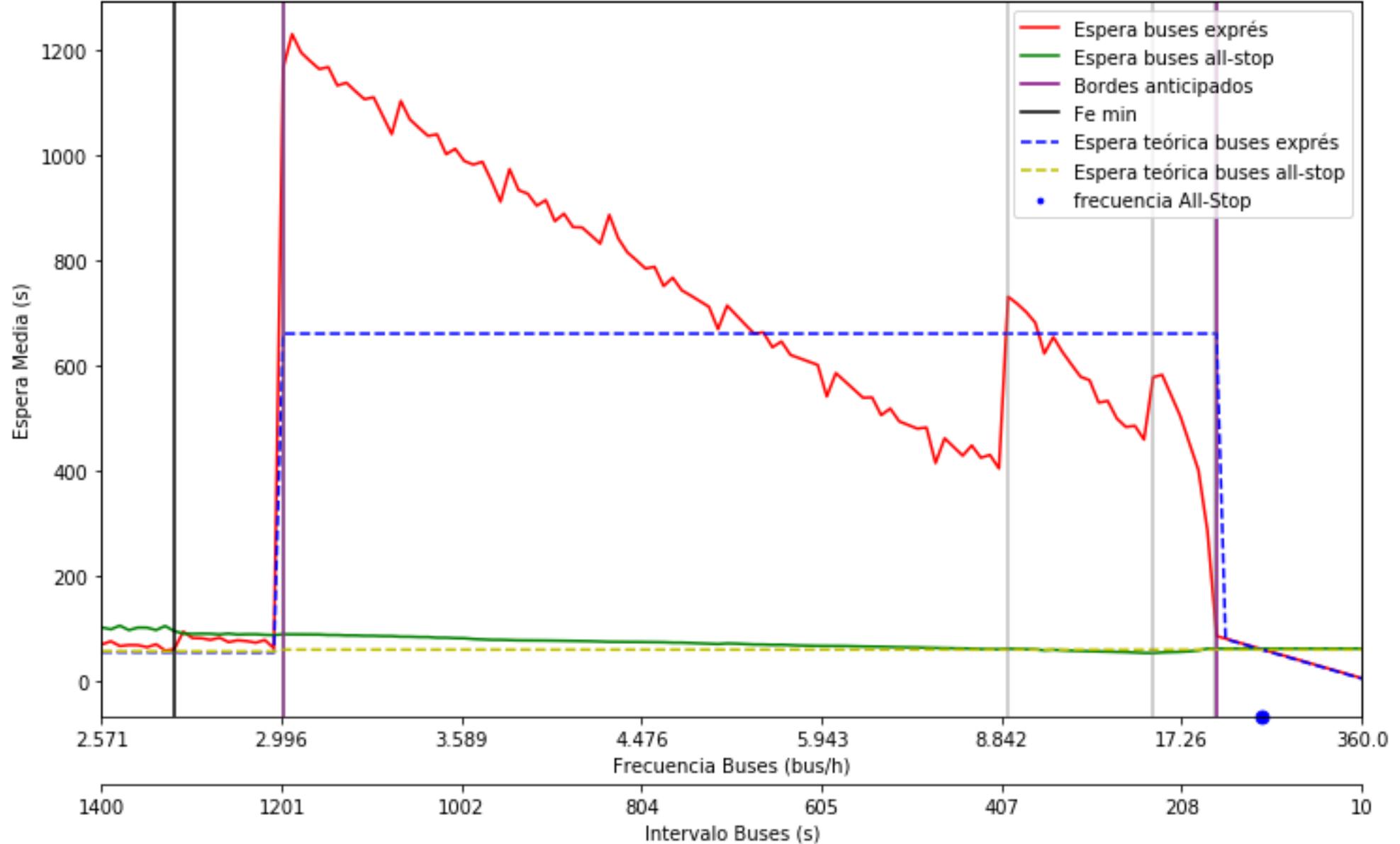
Una forma de **calcular** la espera en cola ( $w_i$ ) que **contempla un proceso de salida en lotes** es la siguiente:

$$w_i = \frac{0.5}{f_i} + \frac{\left\lceil \frac{pos_u}{\tilde{b}} \right\rceil - 1}{f_i}$$

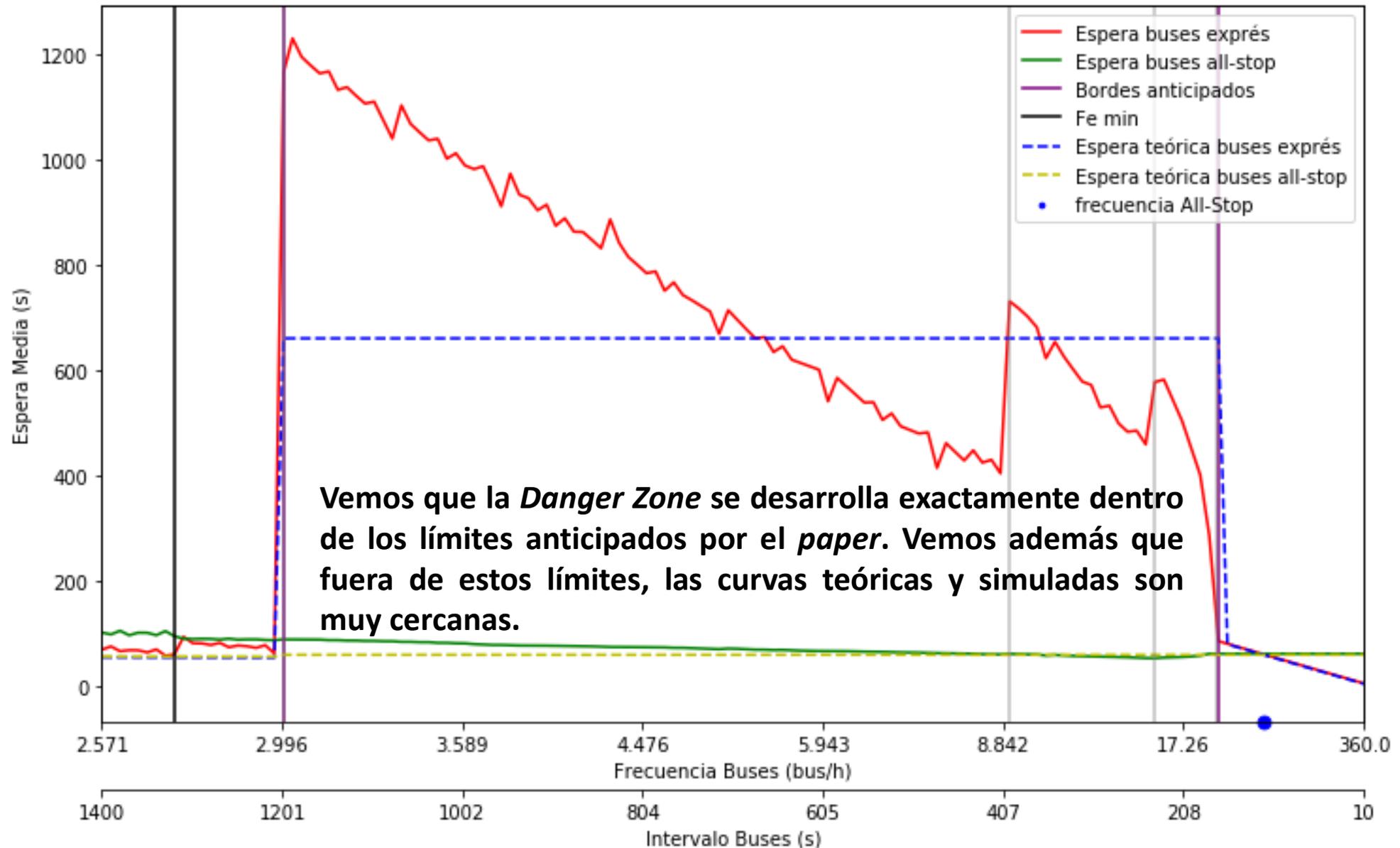
**Esta formulación de espera en cola es la utilizada en todo el experimento de validación.**

Además la simulación aplica pequeños cambios a la formulación de  $w_i$  si el usuario en cola ya vio pasar un bus del tipo considerado.

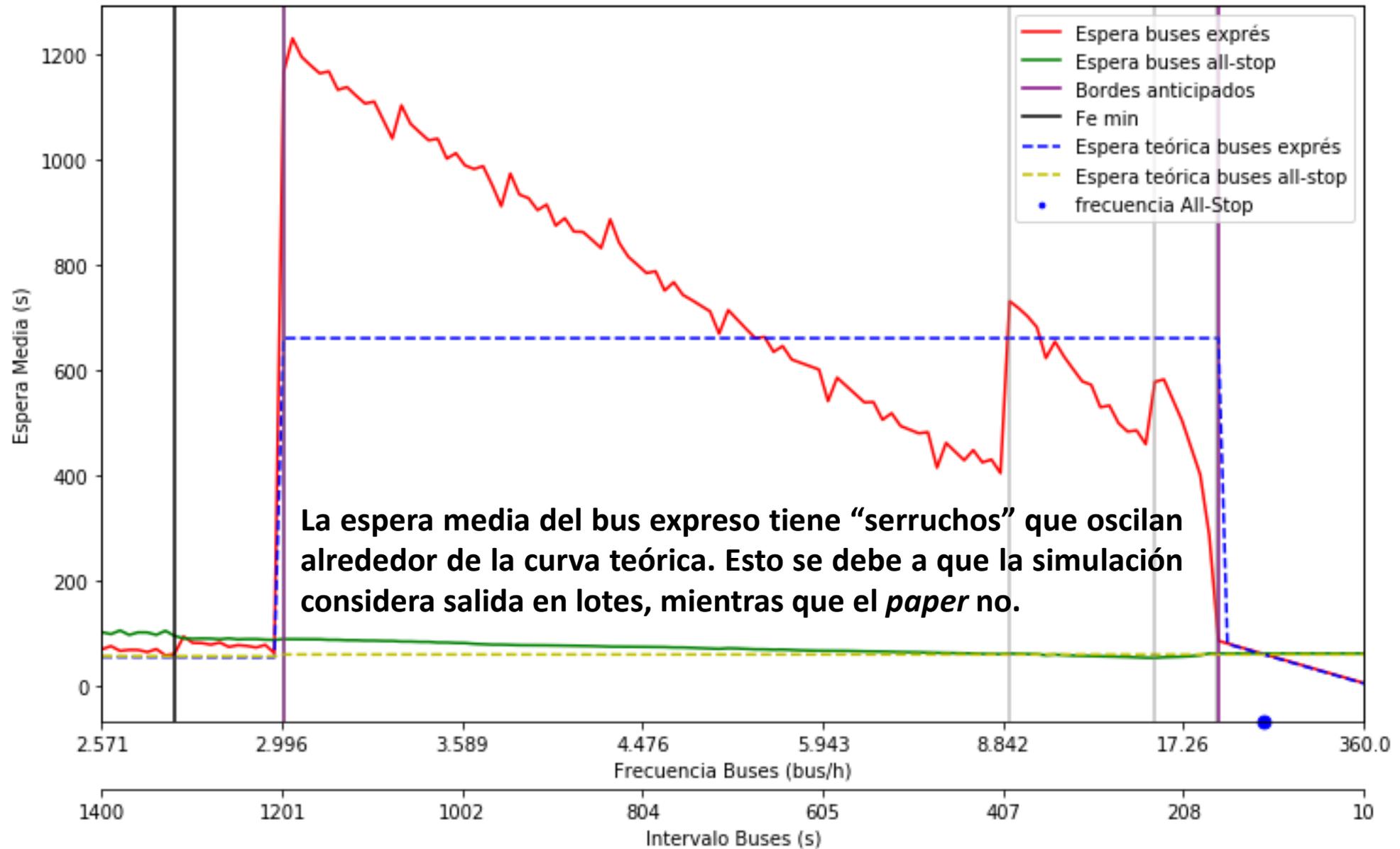
# Resultados experimento de validación:



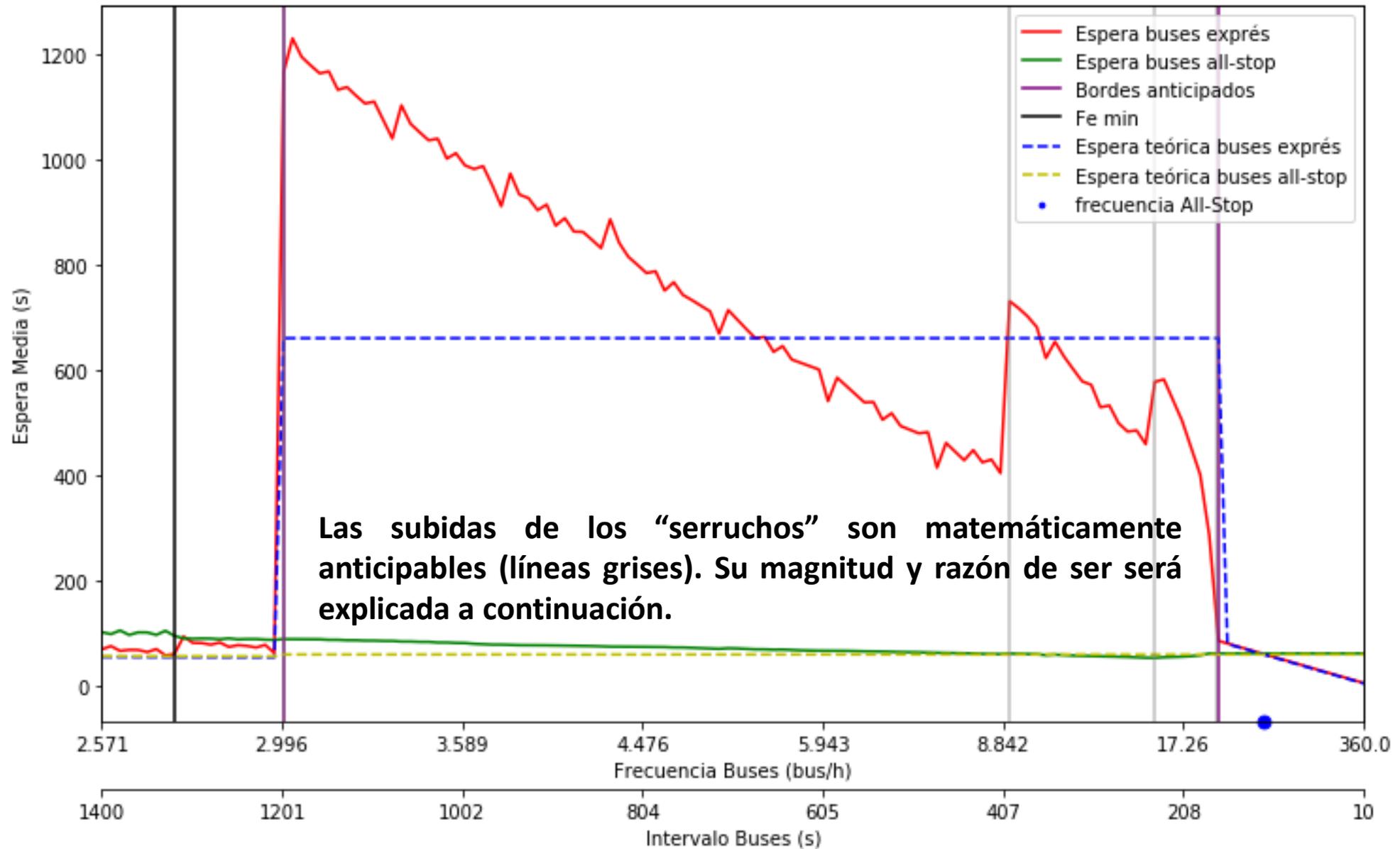
# Resultados experimento de validación:



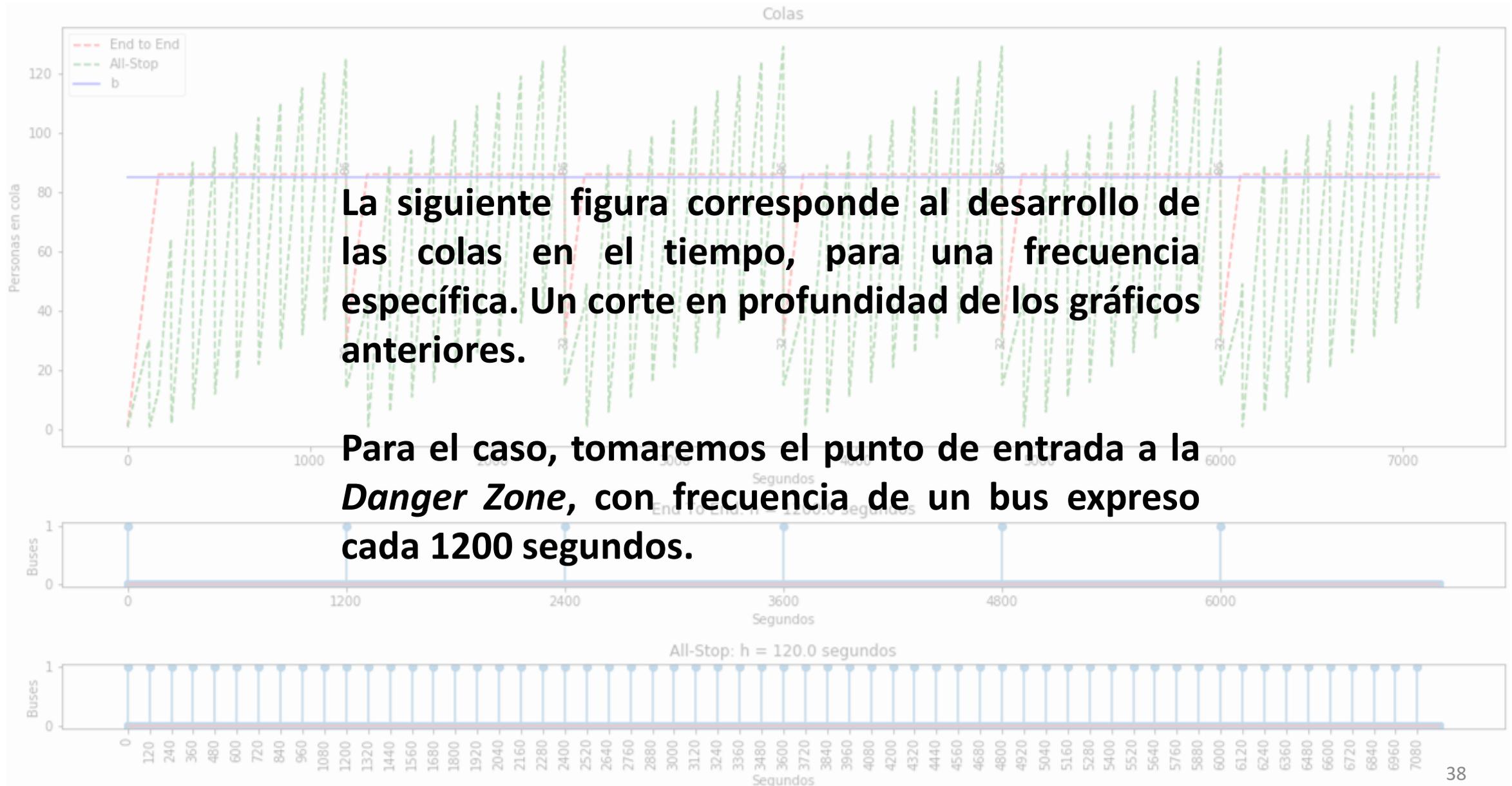
# Resultados experimento de validación:



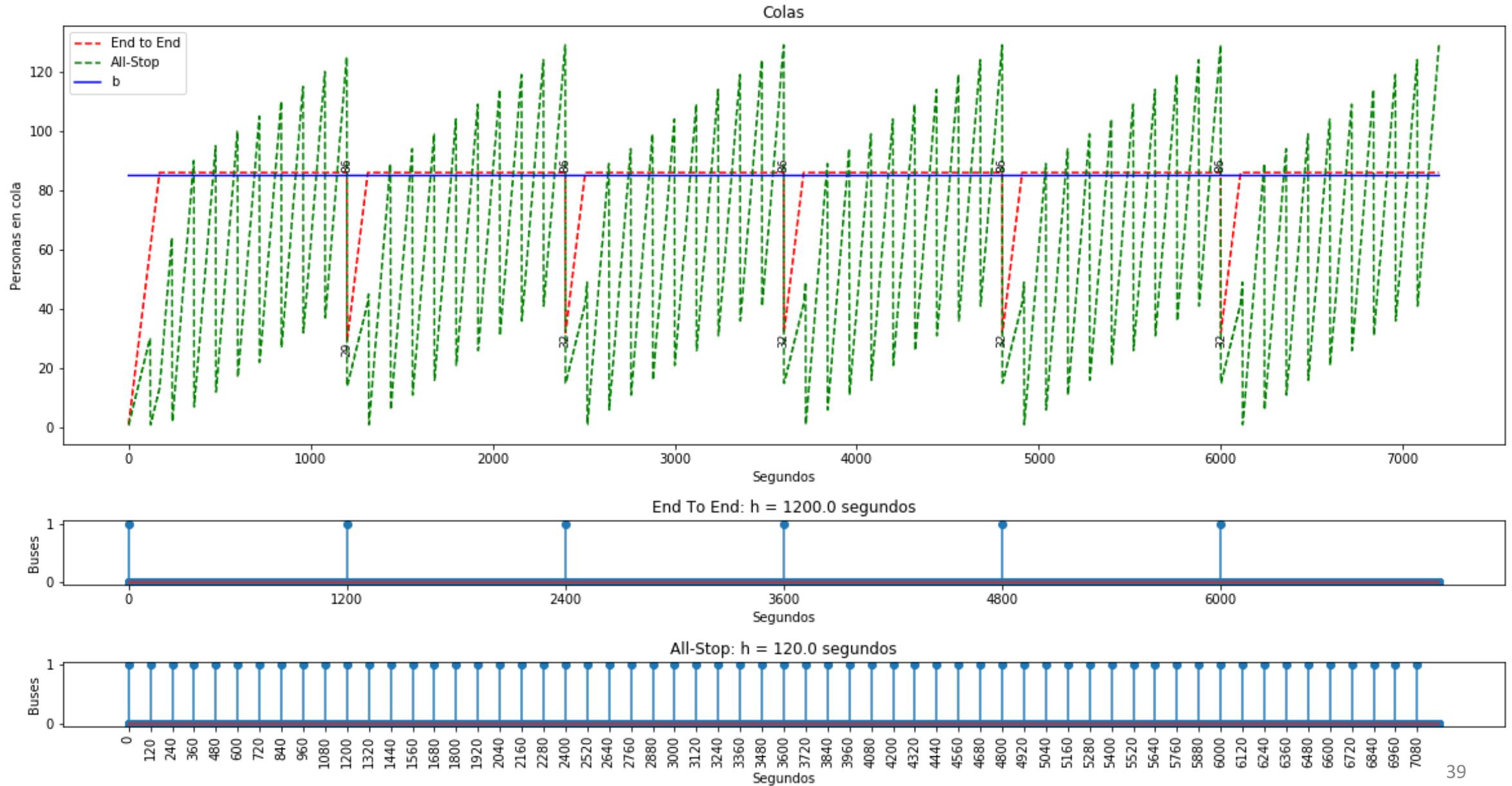
# Resultados experimento de validación:



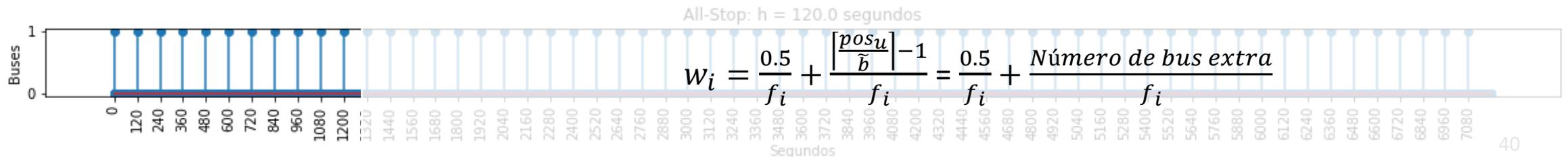
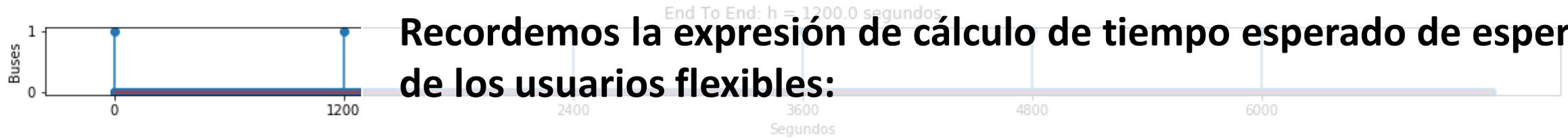
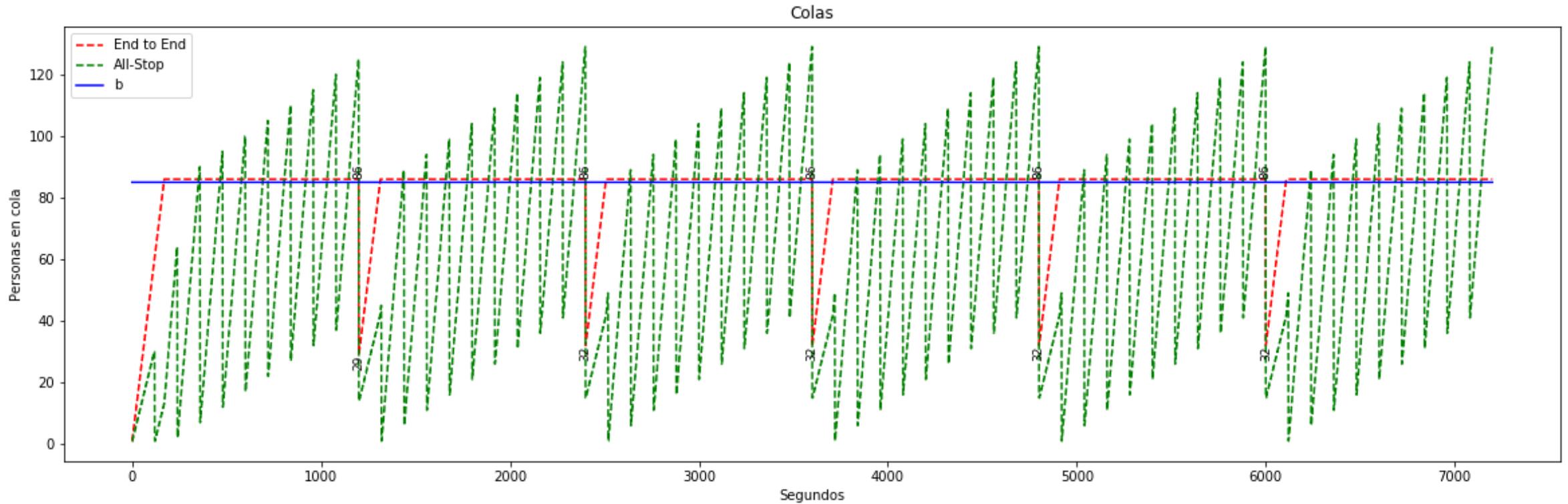
# Resultados experimento de validación:



# Resultados experimento de validación:



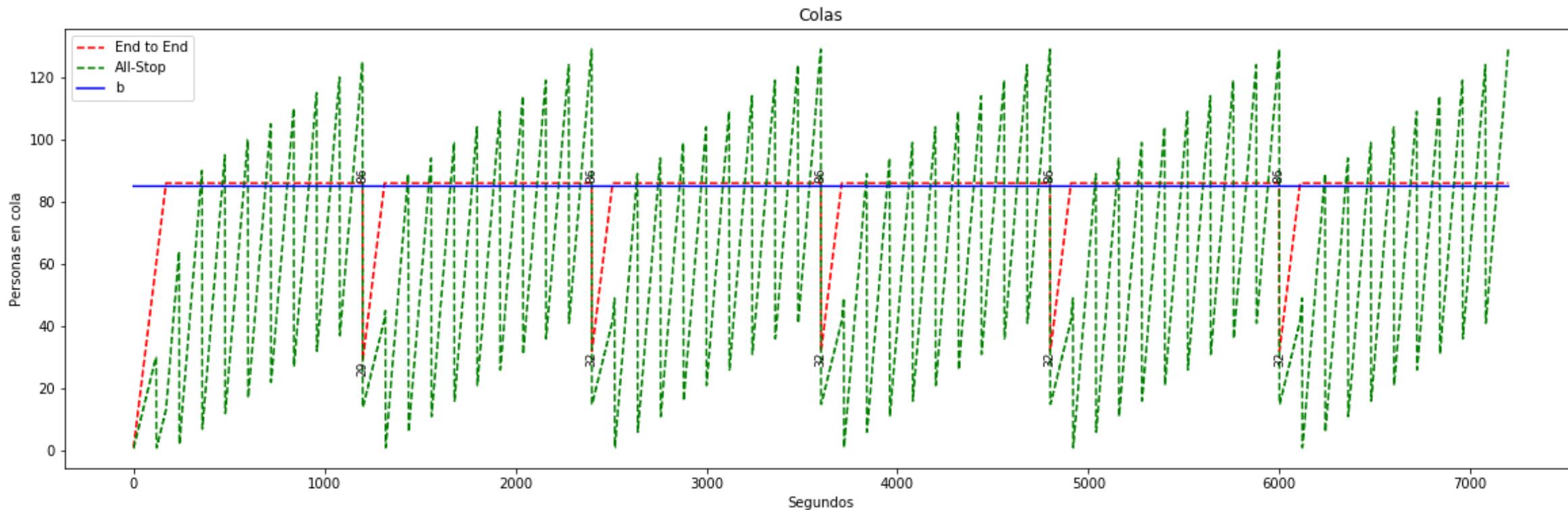
# Resultados experimento de validación:



**Recordemos la expresión de cálculo de tiempo esperado de espera de los usuarios flexibles:**

$$w_i = \frac{0.5}{f_i} + \frac{\left\lceil \frac{posu}{\bar{b}} \right\rceil - 1}{f_i} = \frac{0.5}{f_i} + \frac{\text{Número de bus extra}}{f_i}$$

# Resultados experimento de validación:

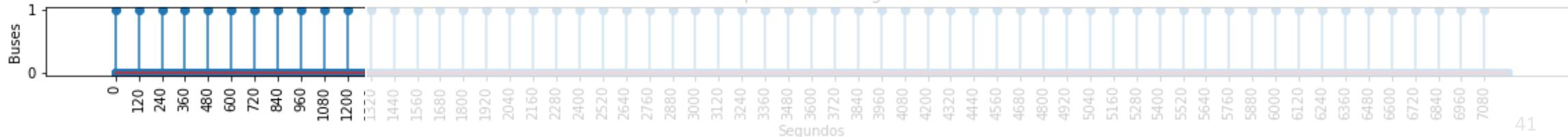


End To End:  $h = 1200.0$  segundos

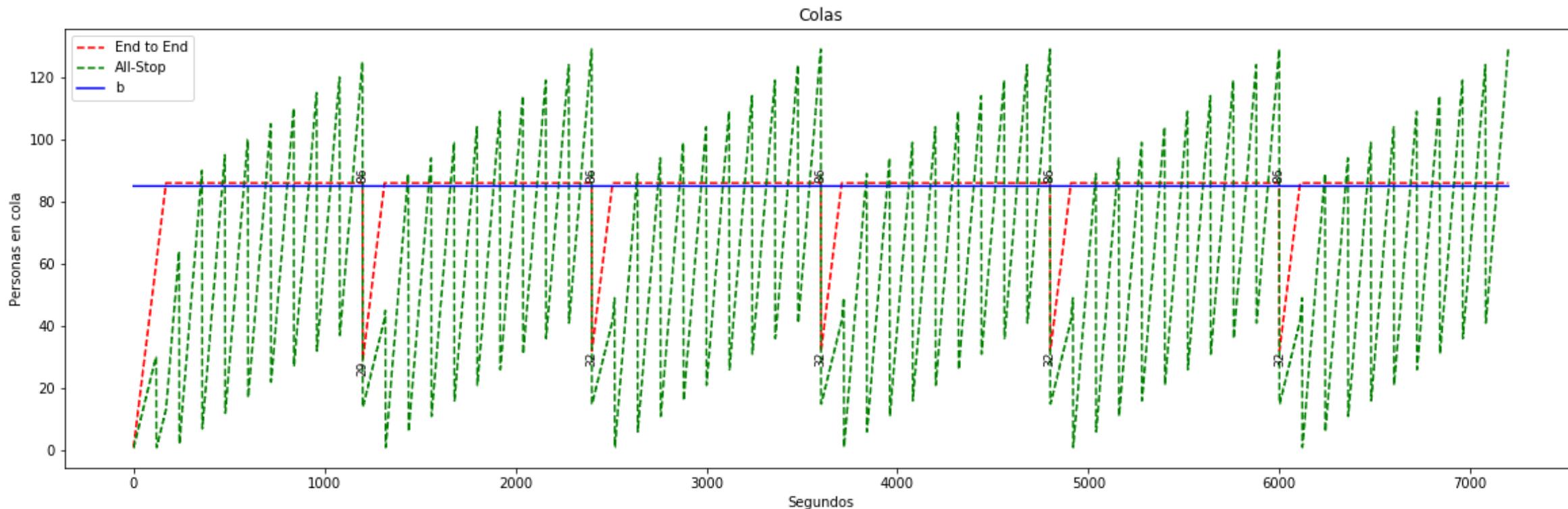


Un usuario flexible se une a la fila del bus expreso si:  $t_E < t_A$

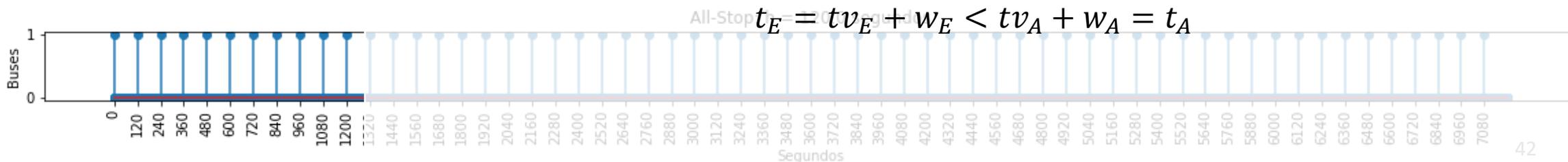
All-Stop:  $h = 120.0$  segundos



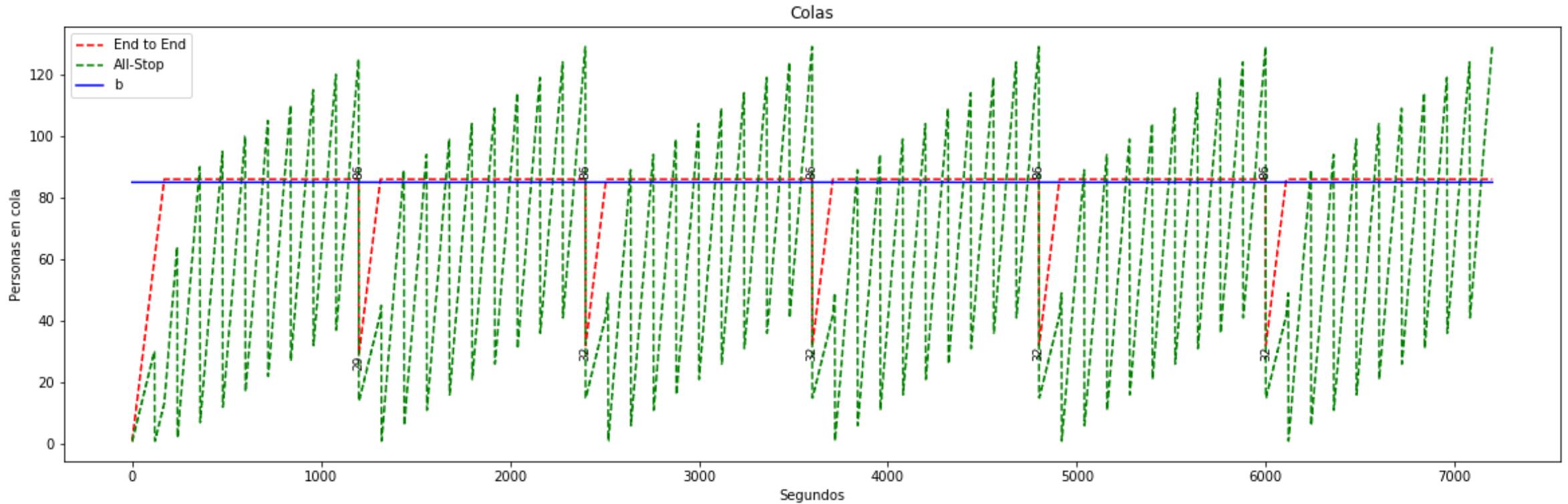
# Resultados experimento de validación:



Un usuario flexible se une a la fila del bus expreso si:  $t_E < t_A$



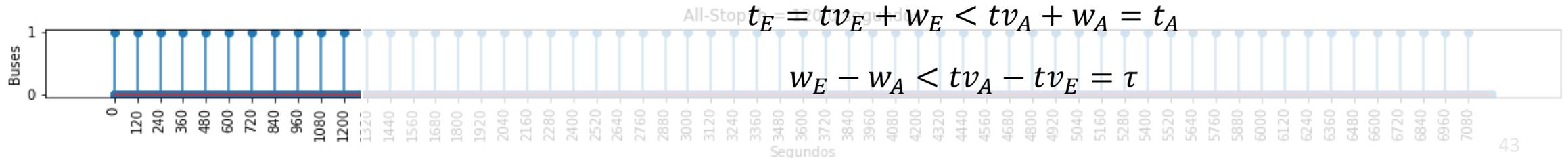
# Resultados experimento de validación:



End To End:  $h = 1200.0$  segundos



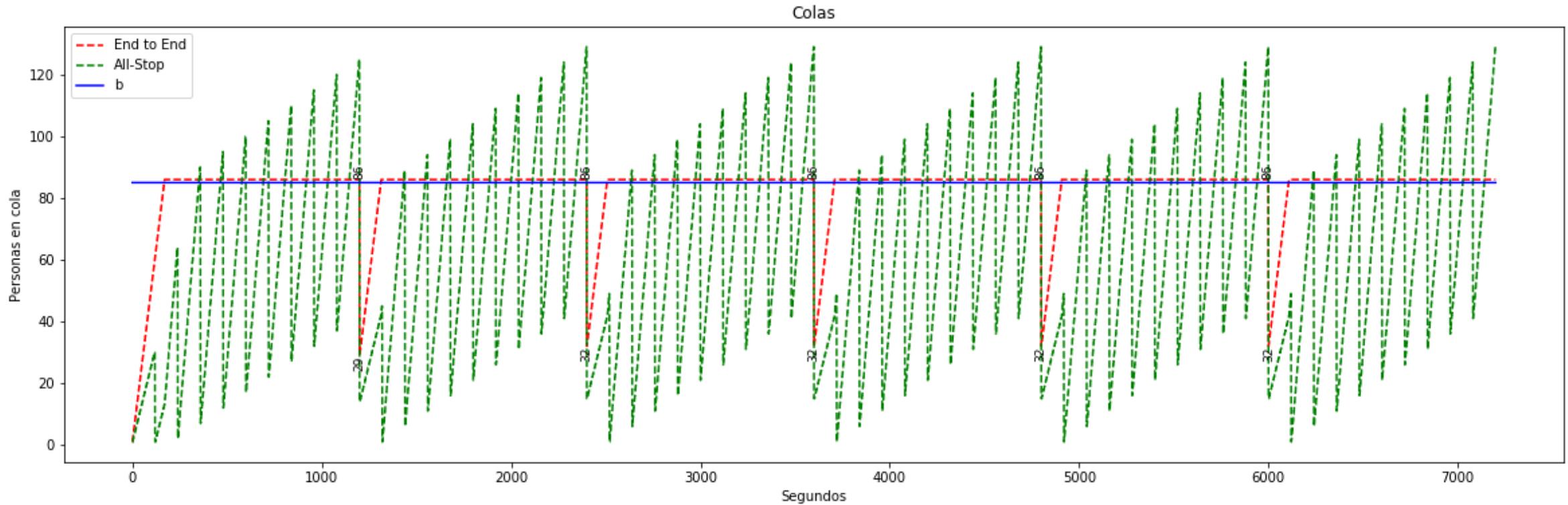
Un usuario flexible se une a la fila del bus expreso si:  $t_E < t_A$



All-Stop:  $t_E = tv_E + w_E < tv_A + w_A = t_A$

$w_E - w_A < tv_A - tv_E = \tau$

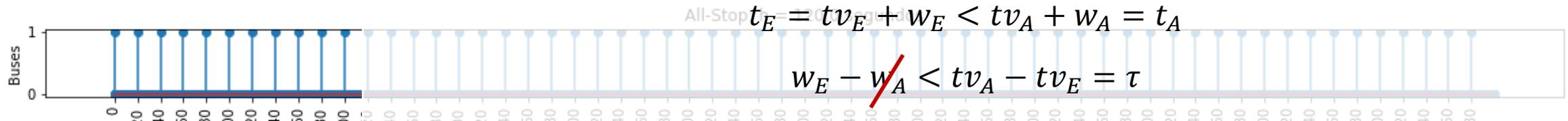
# Resultados experimento de validación:



End To End:  $h = 1200.0$  segundos



Un usuario flexible se une a la fila del bus expreso si:  $t_E < t_A$

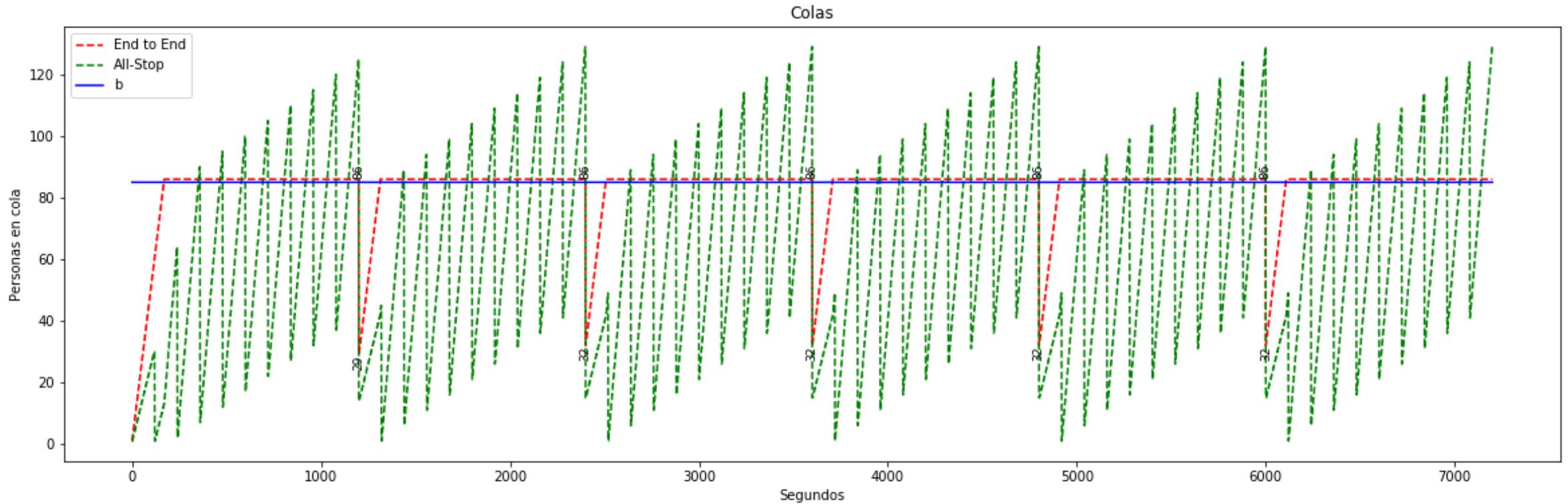


$$\text{All-Stop } t_E = tv_E + w_E < tv_A + w_A = t_A$$

$$w_E - w_A < tv_A - tv_E = \tau$$

Por ahora asumamos que es despreciable.

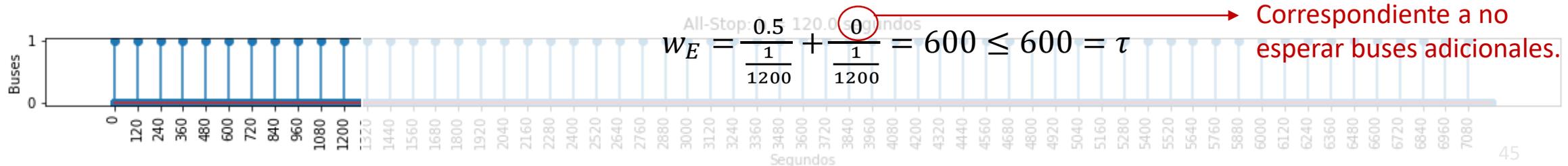
# Resultados experimento de validación:



End To End:  $h = 1200.0$  segundos



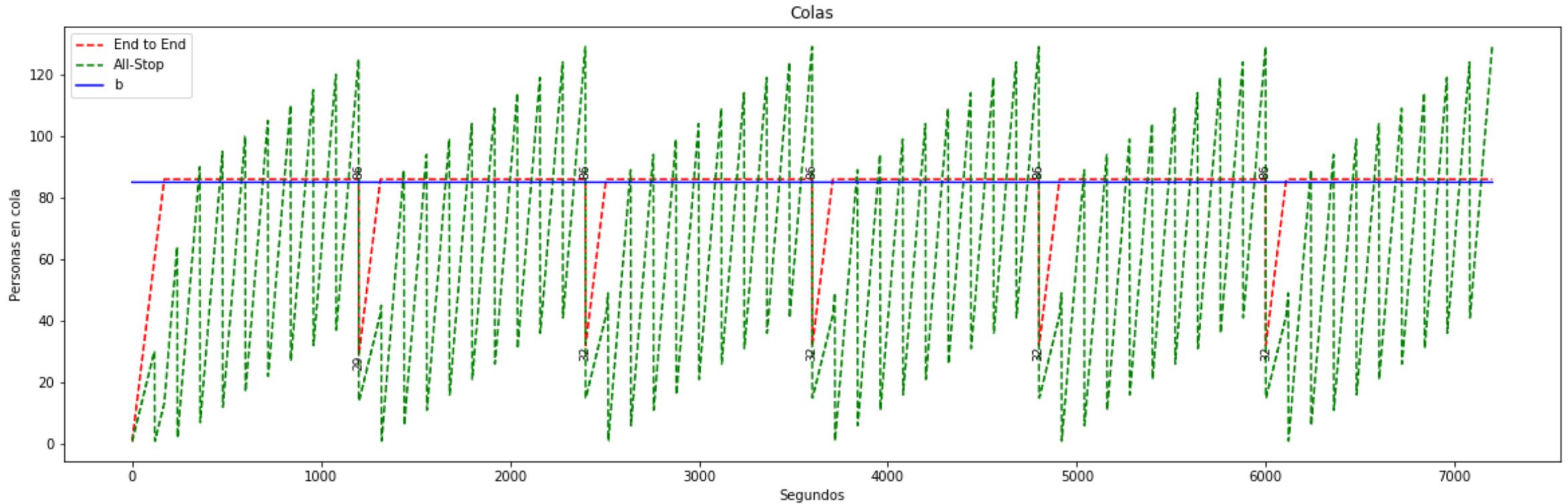
**Si la fila tiene menos de  $b$  personas delante del usuario:**



$$W_E = \frac{0.5}{1} + \frac{0}{1} = 600 \leq 600 = \tau$$

Correspondiente a no esperar buses adicionales.

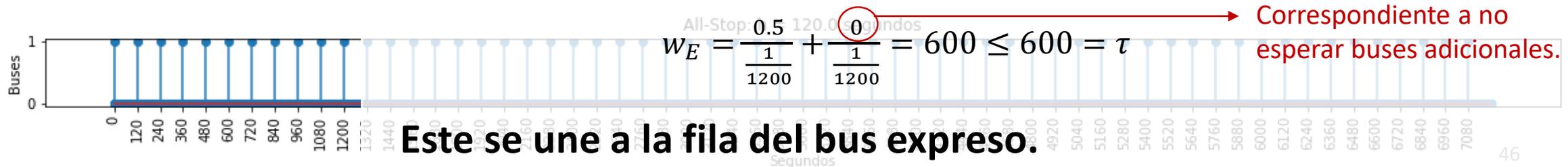
# Resultados experimento de validación:



End To End:  $h = 1200.0$  segundos



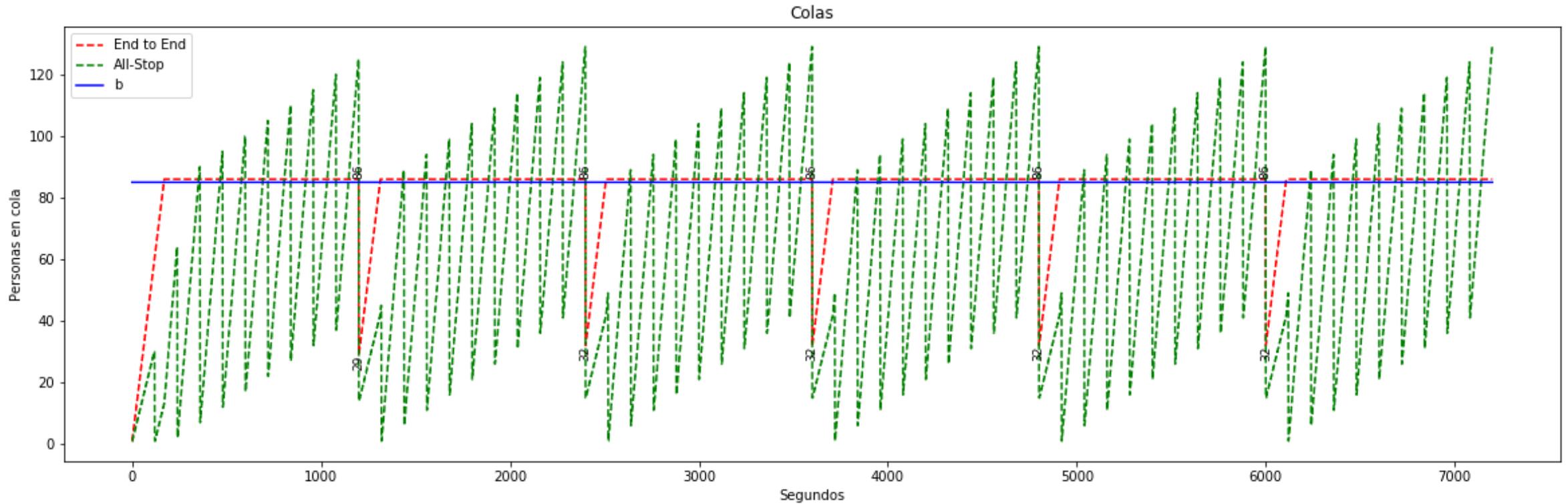
Si la fila tiene menos de  $b$  personas delante del usuario:



$$W_E = \frac{0.5}{1200} + \frac{0}{1200} = 600 \leq 600 = \tau$$

Correspondiente a no esperar buses adicionales.

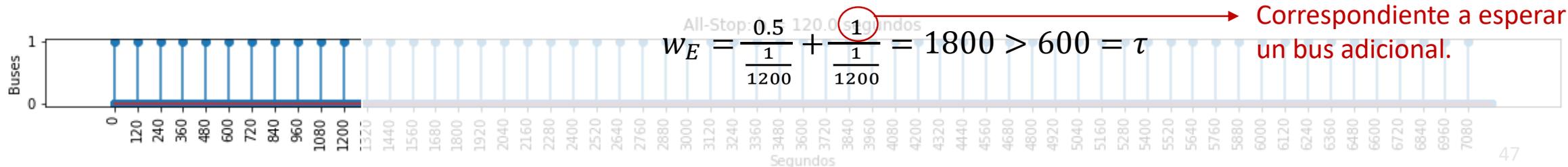
# Resultados experimento de validación:



End To End:  $h = 1200.0$  segundos



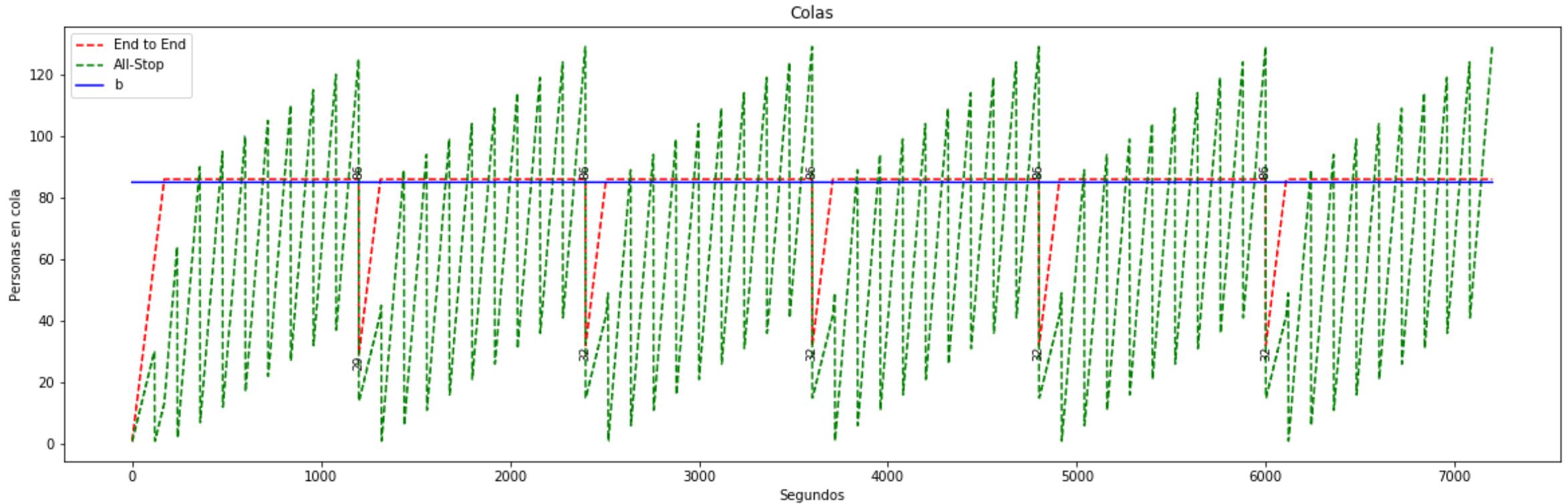
**Si la fila tiene más de  $b$  personas delante del usuario:**



$$w_E = \frac{0.5}{1200} + \frac{1}{1200} = 1800 > 600 = \tau$$

Correspondiente a esperar un bus adicional.

# Resultados experimento de validación:



End To End:  $h = 1200.0$  segundos



**Si la fila tiene más de  $b$  personas delante del usuario:**

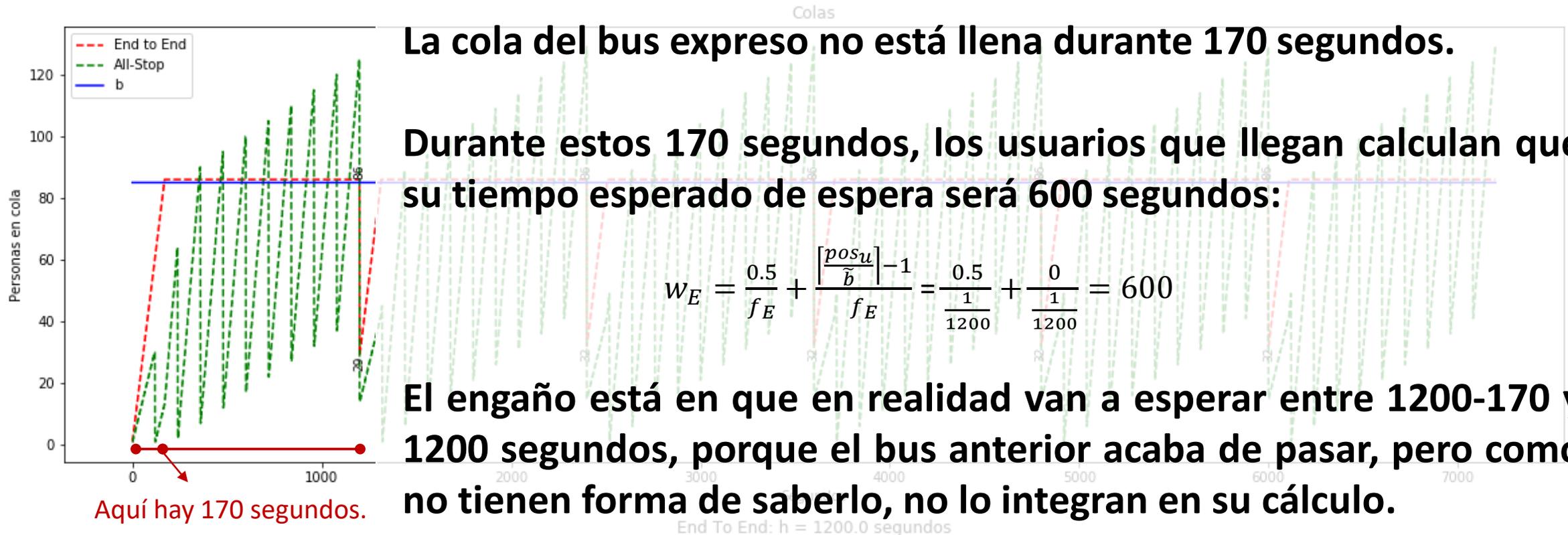


$$w_E = \frac{0.5}{1200} + \frac{1}{1200} = 1800 > 600 = \tau$$

Correspondiente a esperar un bus adicional.

**Este NO se une a la fila del bus expreso.**

# Resultados experimento de validación:



La cola del bus expreso no está llena durante 170 segundos.

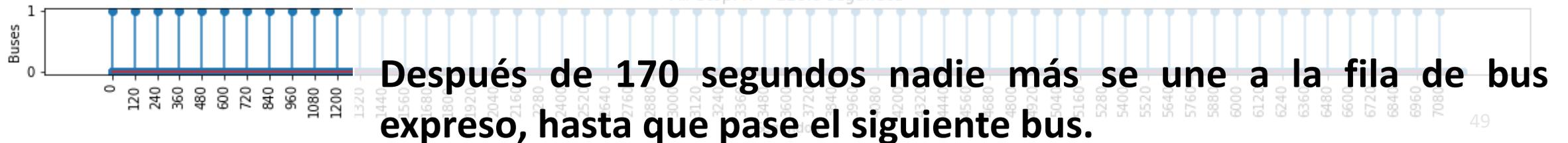
Durante estos 170 segundos, los usuarios que llegan calculan que su tiempo esperado de espera será 600 segundos:

$$w_E = \frac{0.5}{f_E} + \frac{\left\lfloor \frac{pos_u}{\tilde{b}} \right\rfloor - 1}{f_E} = \frac{0.5}{\frac{1}{1200}} + \frac{0}{\frac{1}{1200}} = 600$$

El engaño está en que en realidad van a esperar entre 1200-170 y 1200 segundos, porque el bus anterior acaba de pasar, pero como no tienen forma de saberlo, no lo integran en su cálculo.

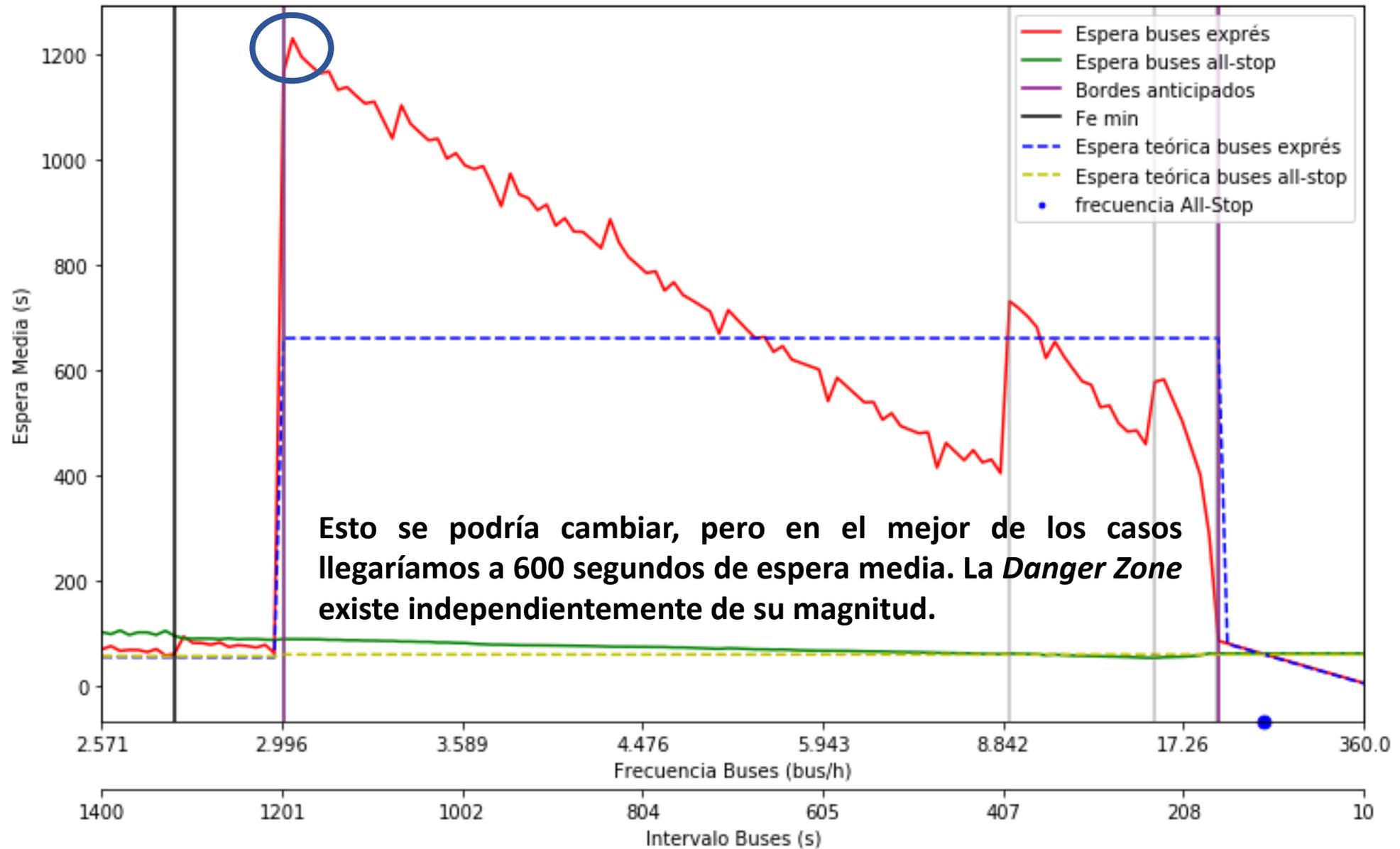


Lo que explica que la espera media llegue a magnitudes de 1200 segundos en la entrada de la *Danger Zone*.



Después de 170 segundos nadie más se une a la fila de bus expreso, hasta que pase el siguiente bus.

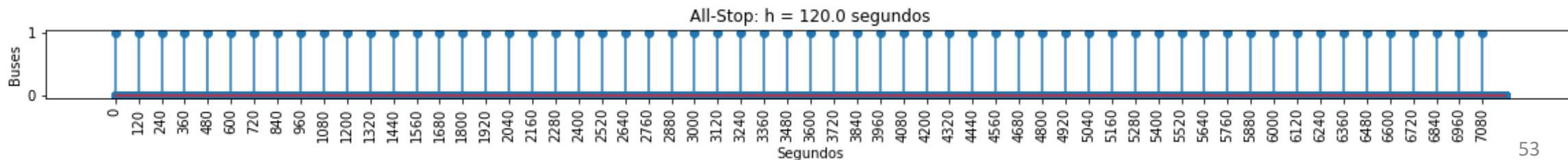
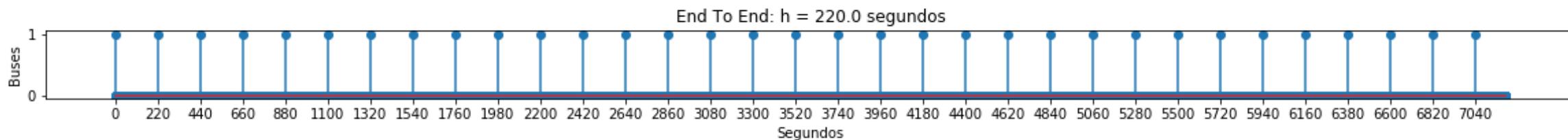
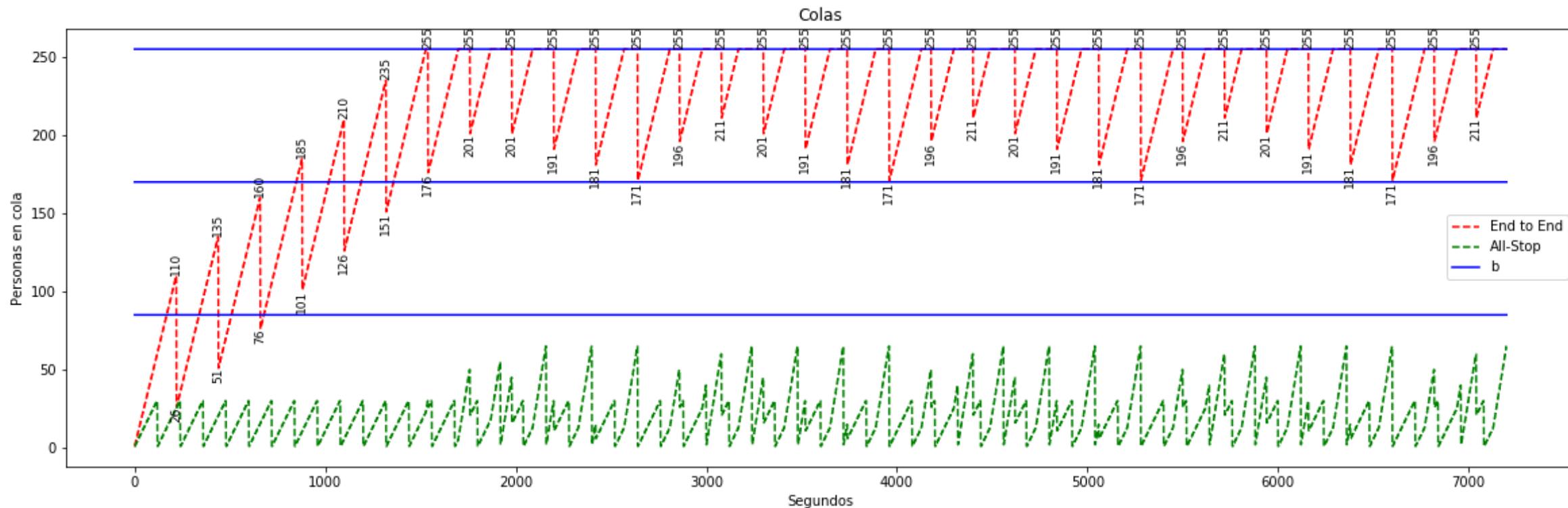
# Resultados experimento de validación:







# Resultados experimento de validación:



# Resultados experimento de validación:

Anticipación de los serruchos:

Posición (x)

$$\frac{0.5}{f_E} + \frac{\left| \frac{pos_u}{\tilde{b}} \right| - 1}{f_E} \leq \tau$$

Magnitud (y)

$$\frac{\left| \frac{pos_u}{\tilde{b}} \right| * \tau}{\left| \frac{pos_u}{\tilde{b}} \right| - 0.5}$$

Con  $\left| \frac{pos_u}{\tilde{b}} \right| = 1$ :  $\frac{0.5}{f_E} + \frac{0}{f_E} \leq 600 \rightarrow f_E = 1200$

$$\frac{1 * 600}{0.5} = 1200$$

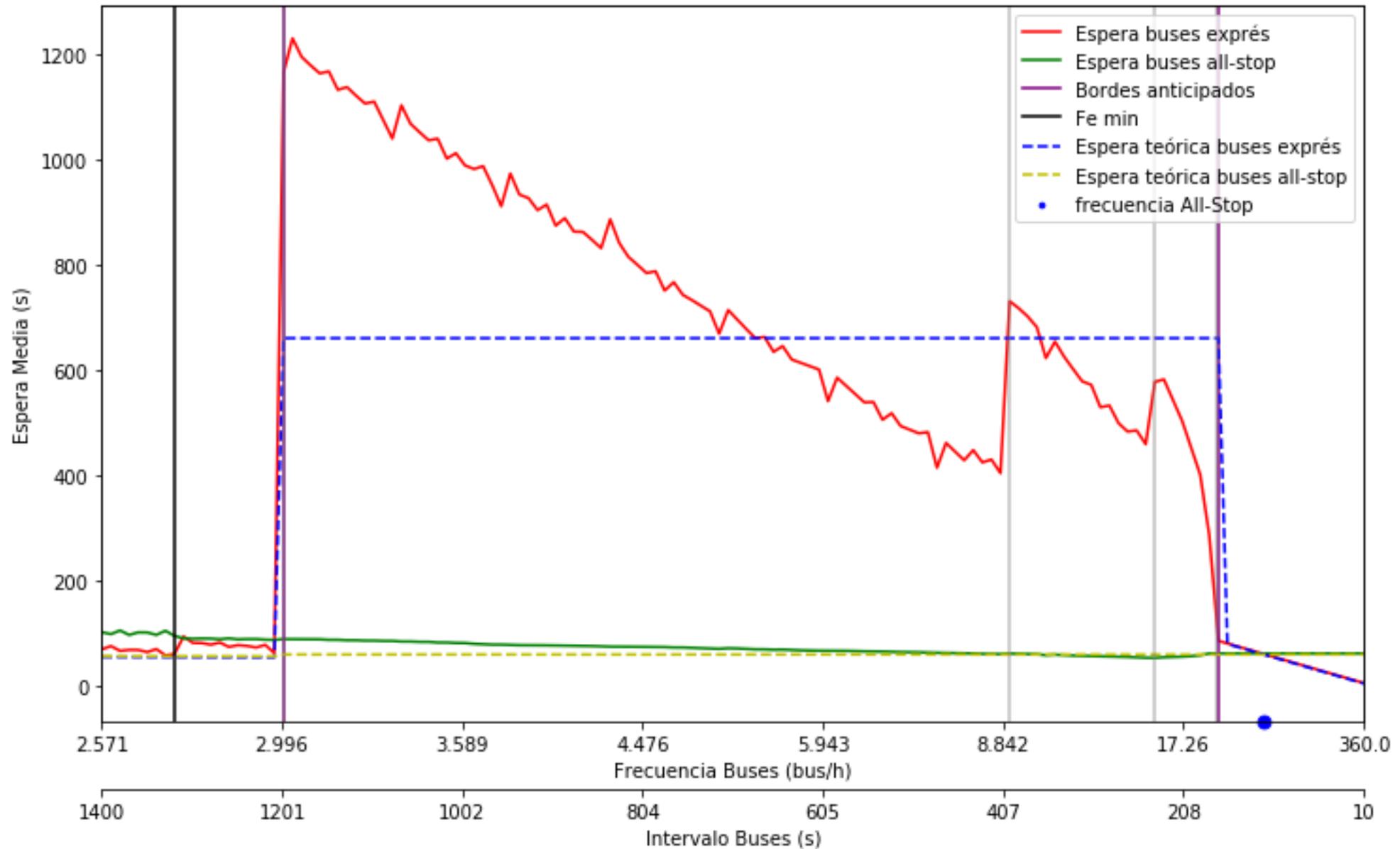
Con  $\left| \frac{pos_u}{\tilde{b}} \right| = 2$ :  $\frac{0.5}{f_E} + \frac{1}{f_E} \leq 600 \rightarrow f_E = 400$

$$\frac{2 * 600}{1.5} = 800$$

Con  $\left| \frac{pos_u}{\tilde{b}} \right| = 3$ :  $\frac{0.5}{f_E} + \frac{2}{f_E} \leq 600 \rightarrow f_E = 220$

$$\frac{3 * 600}{2.5} = 720$$

# Resultados experimento de validación:



# Resultados experimento de validación:

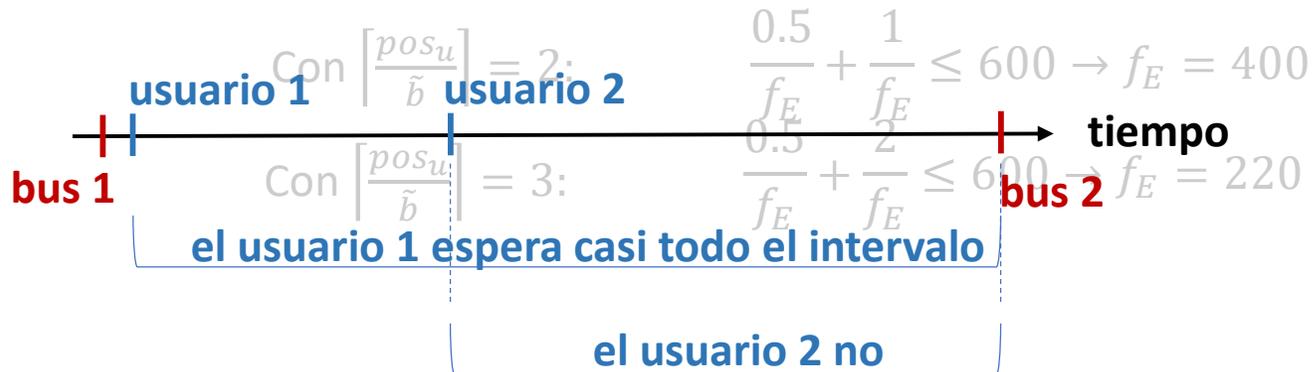
## Anticipación de los serruchos:

Posición (x)

Magnitud (y)

Estos valores sirven como guía, pero no se replican exactamente. Son válidos si el usuario que está calculando llega cuando la fila al principio del intervalo.

Los usuarios que lleguen después percibirán una espera menor, dado que no esperan los intervalos completos:



$$\frac{\left\lceil \frac{pos_u}{\tilde{b}} \right\rceil * \tau}{\left\lceil \frac{pos_u}{\tilde{b}} \right\rceil - 0.5}$$

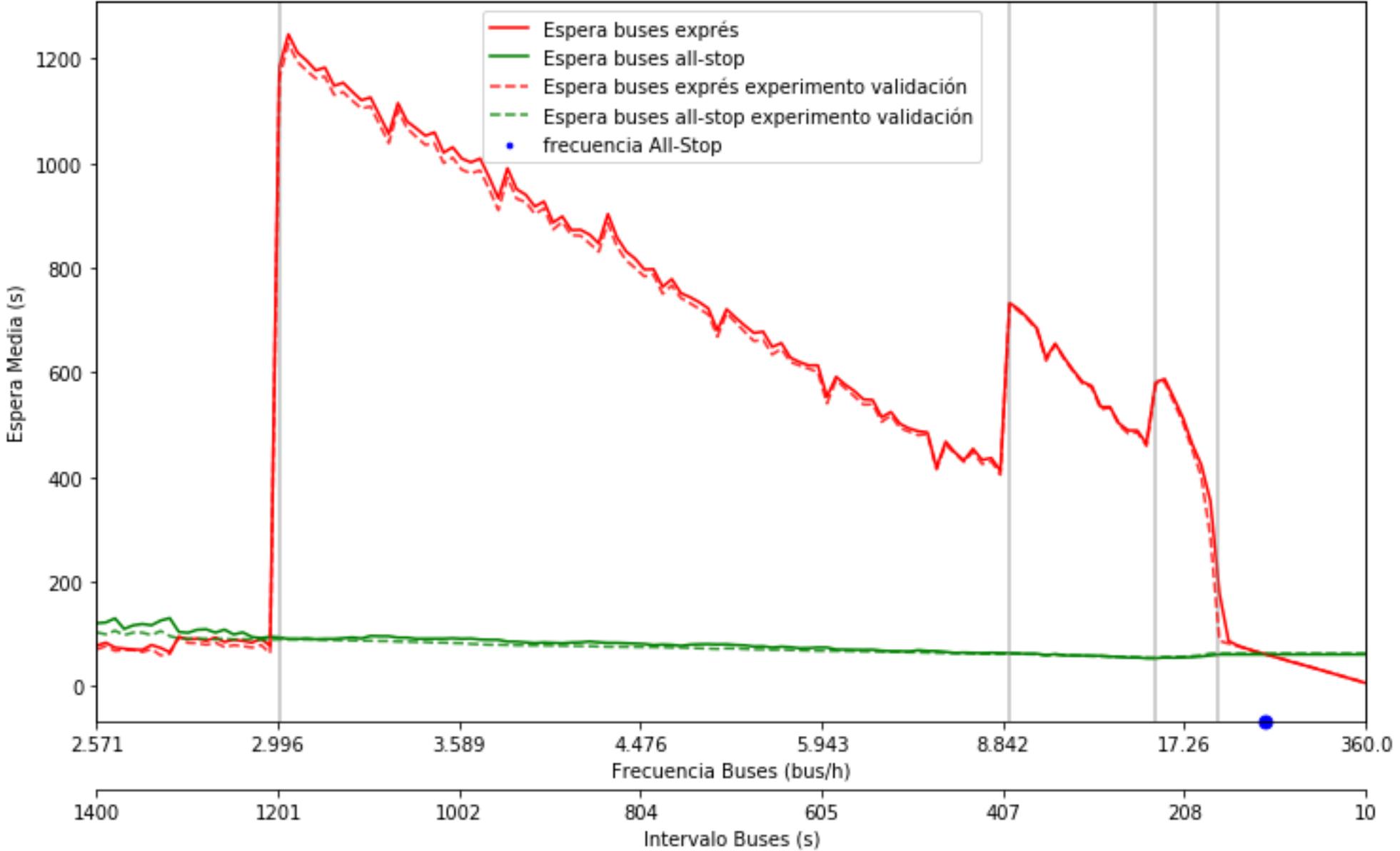
$$\frac{1 * 600}{0.5} = 1200$$

$$\frac{2 * 600}{1.5} = 800$$

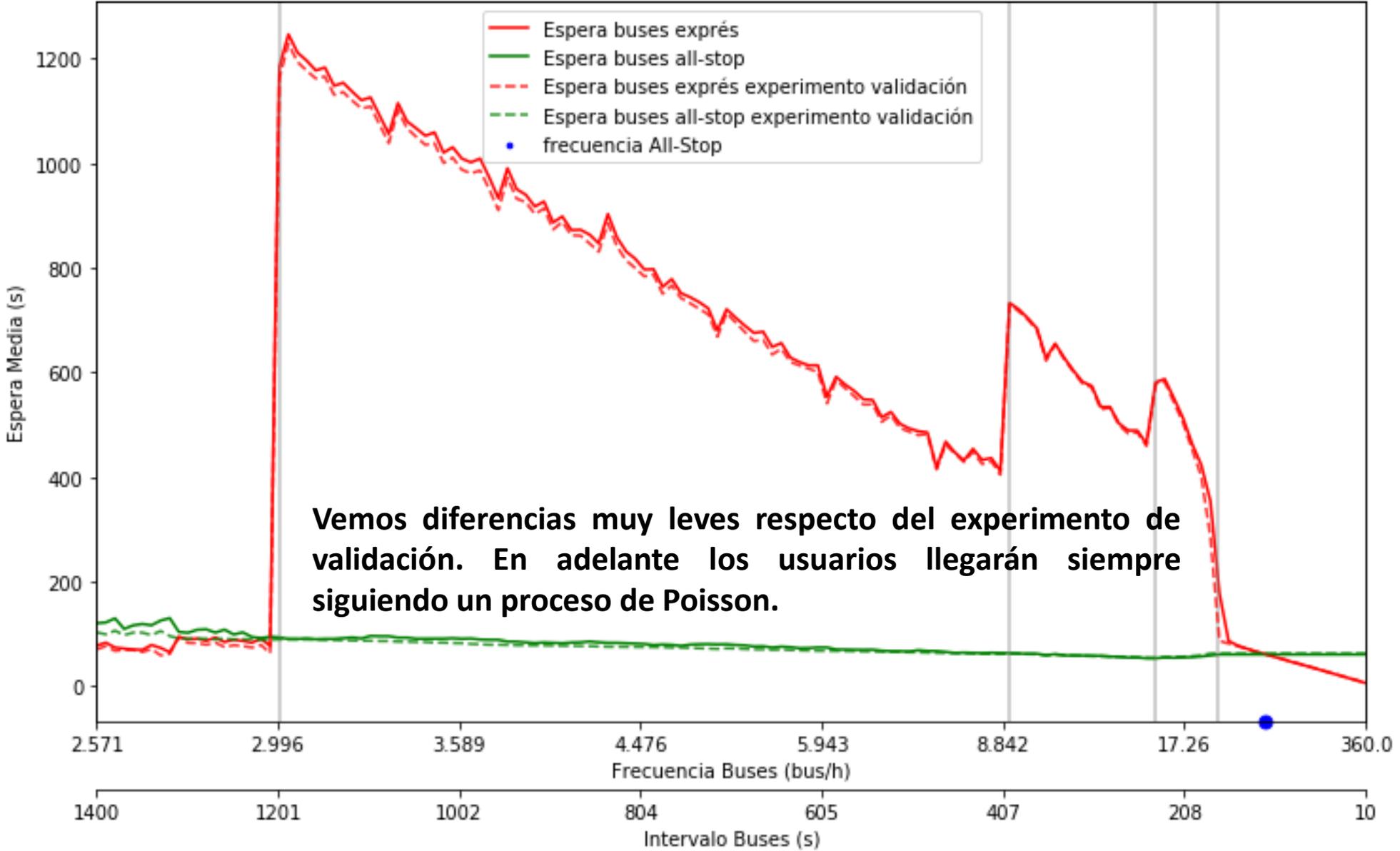
$$\frac{3 * 600}{2.5} = 720$$

## **Parte 4:** extendiendo la *Danger Zone* de los servicios expresos

# Experimento 1: personas que llegan según un proceso de Poisson

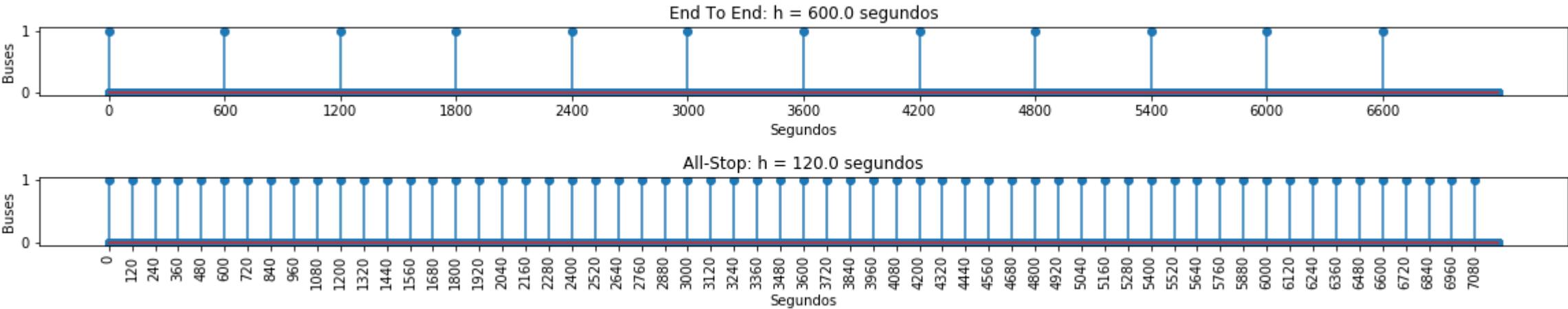


# Experimento 1: personas que llegan según un proceso de Poisson



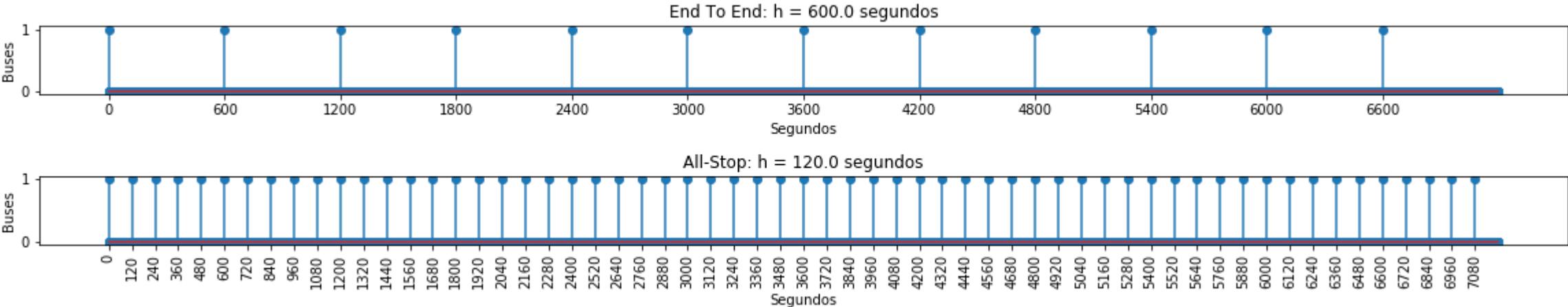
# Experimento 2: buses que no llegan exactamente a la hora

Hasta ahora:

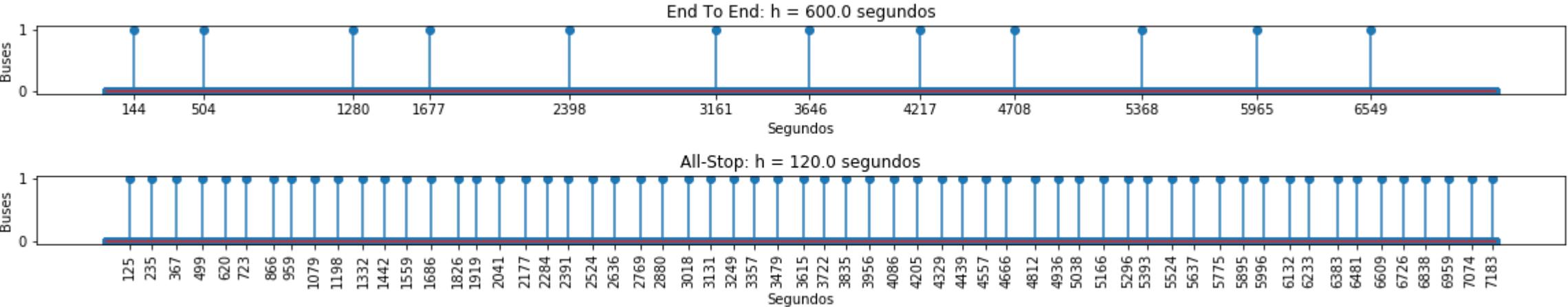


# Experimento 2: buses que no llegan exactamente a la hora

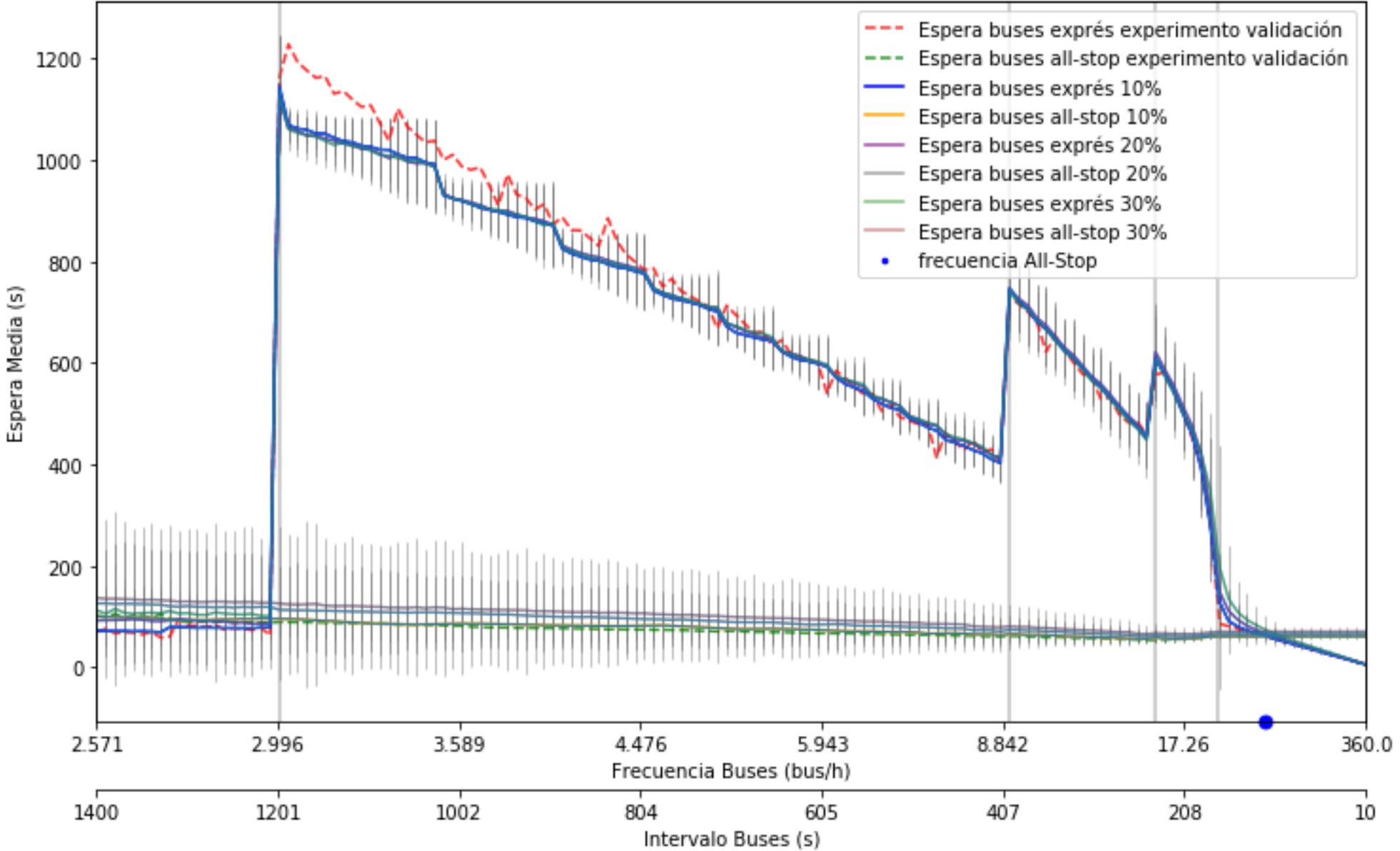
Hasta ahora:



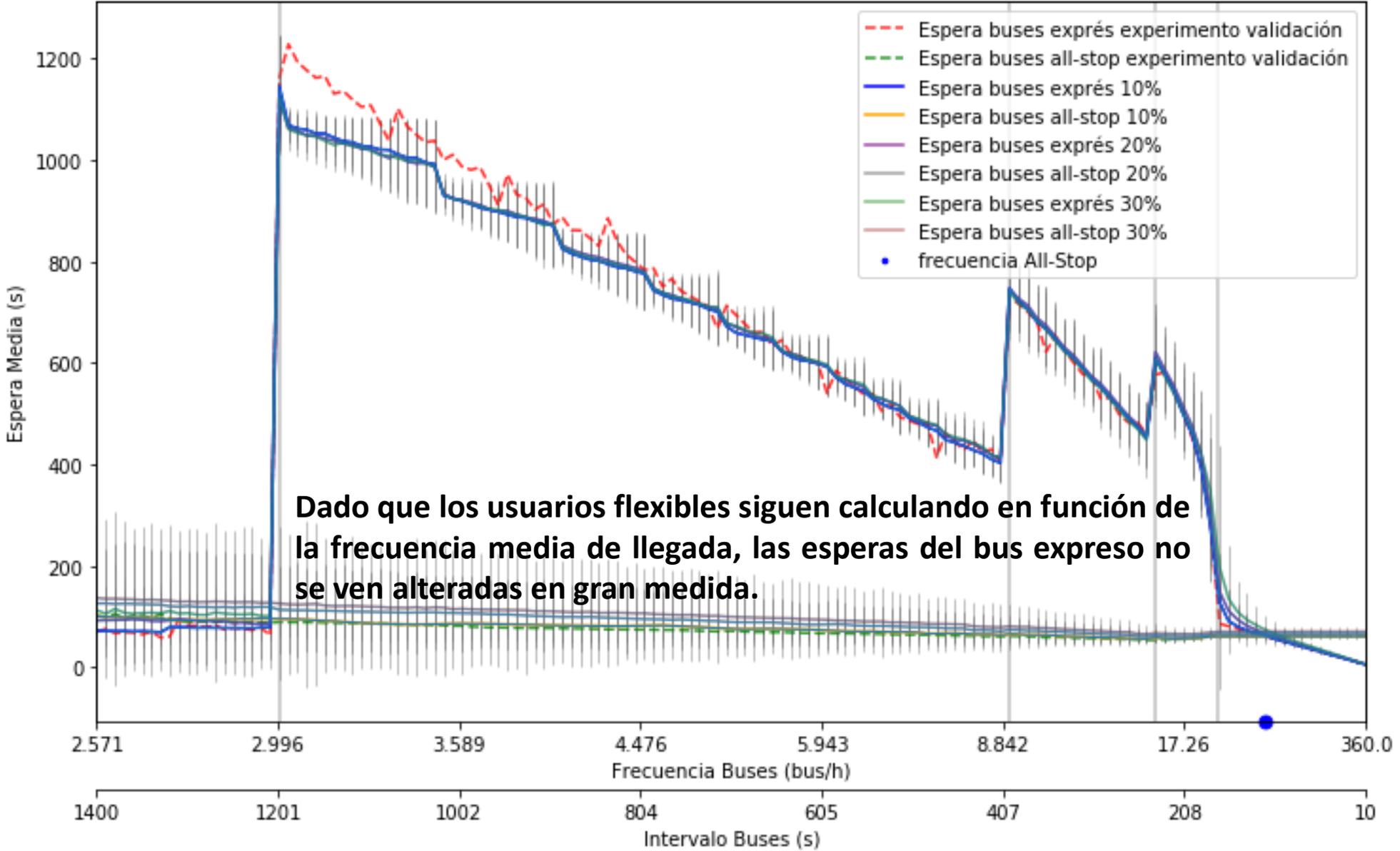
A continuación:



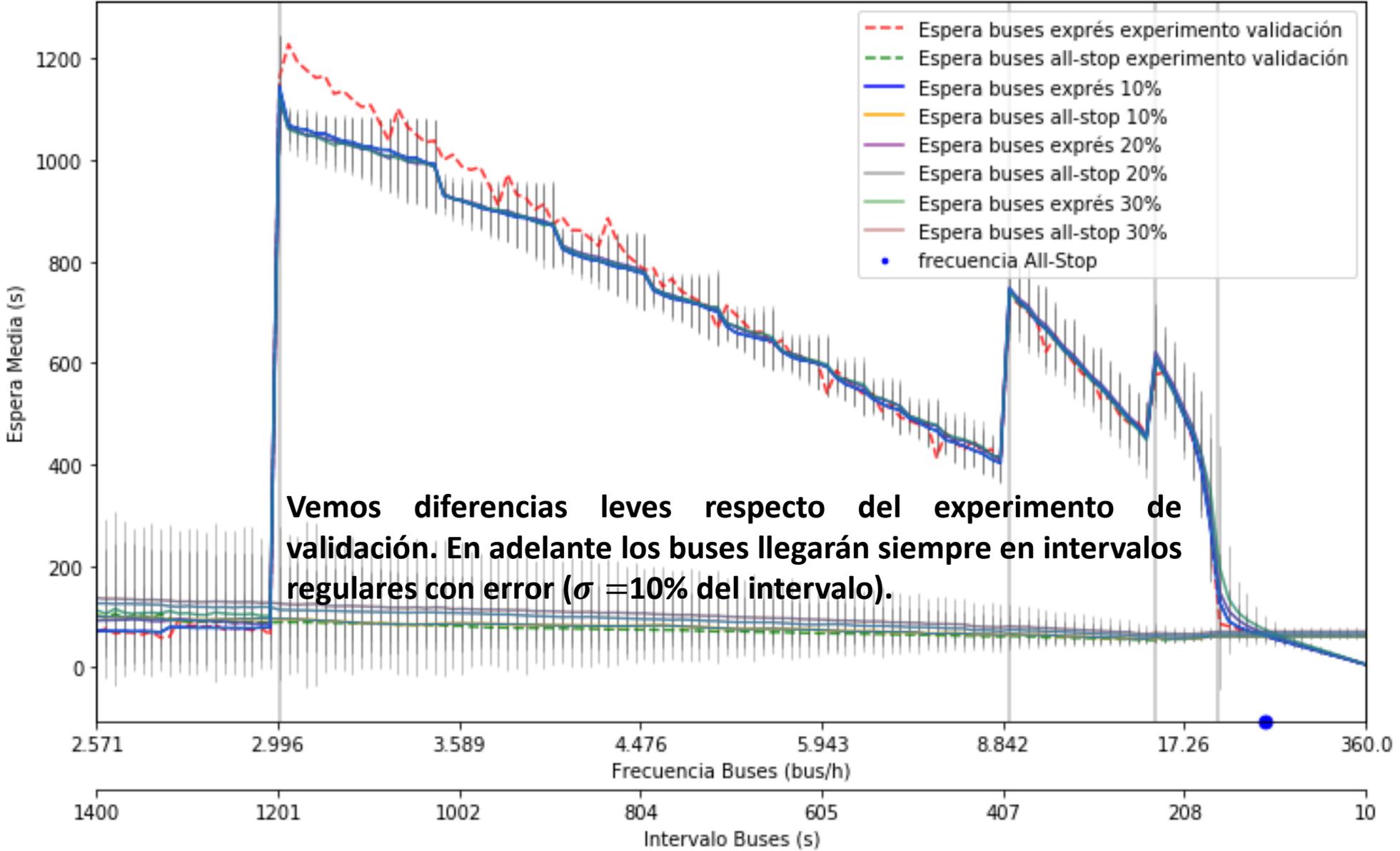
# Experimento 2: buses que no llegan exactamente a la hora



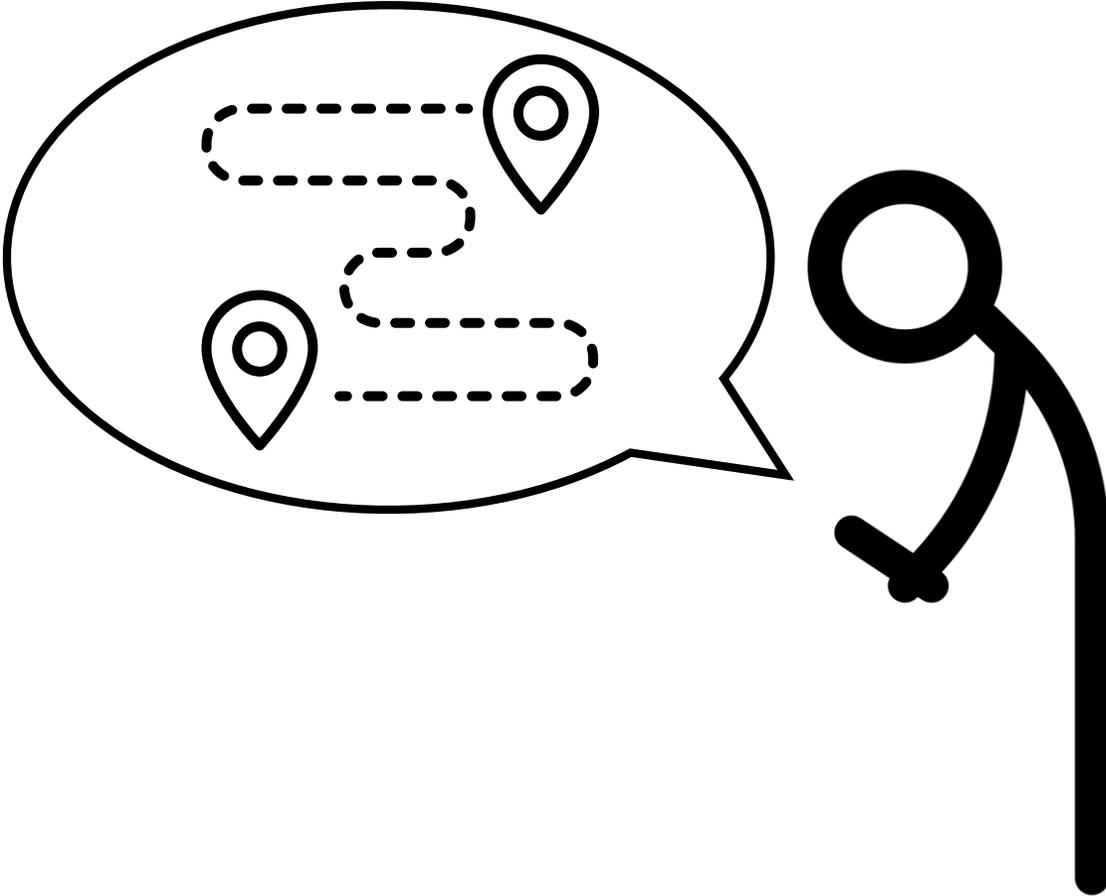
# Experimento 2: buses que no llegan exactamente a la hora



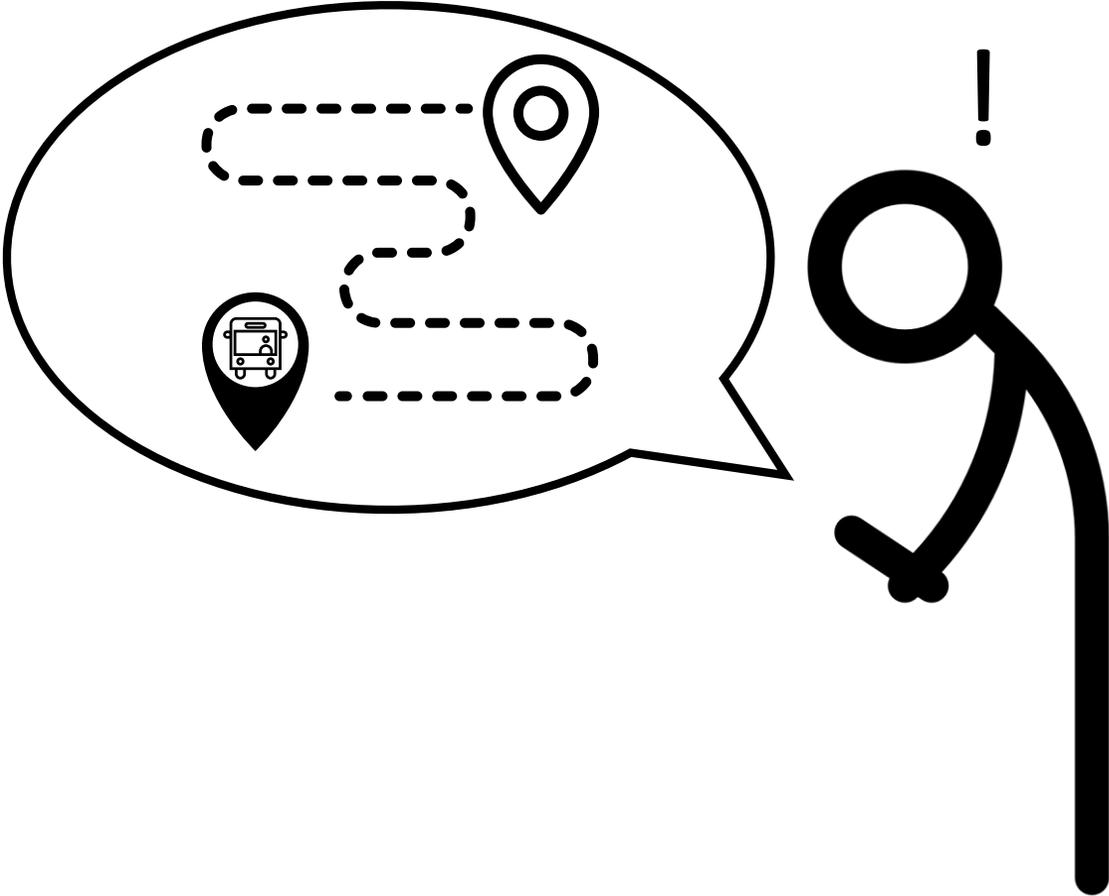
# Experimento 2: buses que no llegan exactamente a la hora



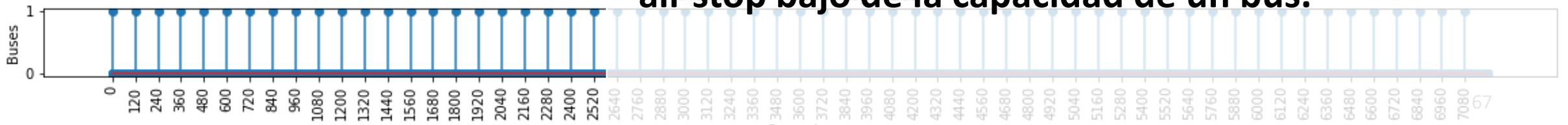
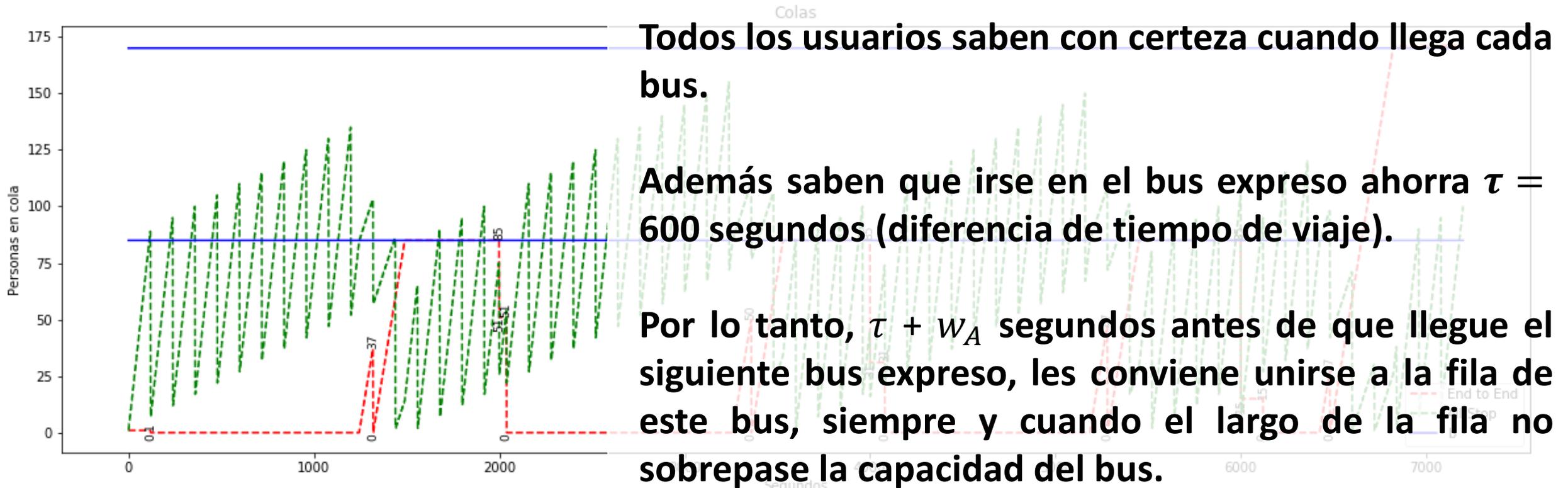
# Experimento 3: usuarios que tienen una app



# Experimento 3: usuarios que tienen una app

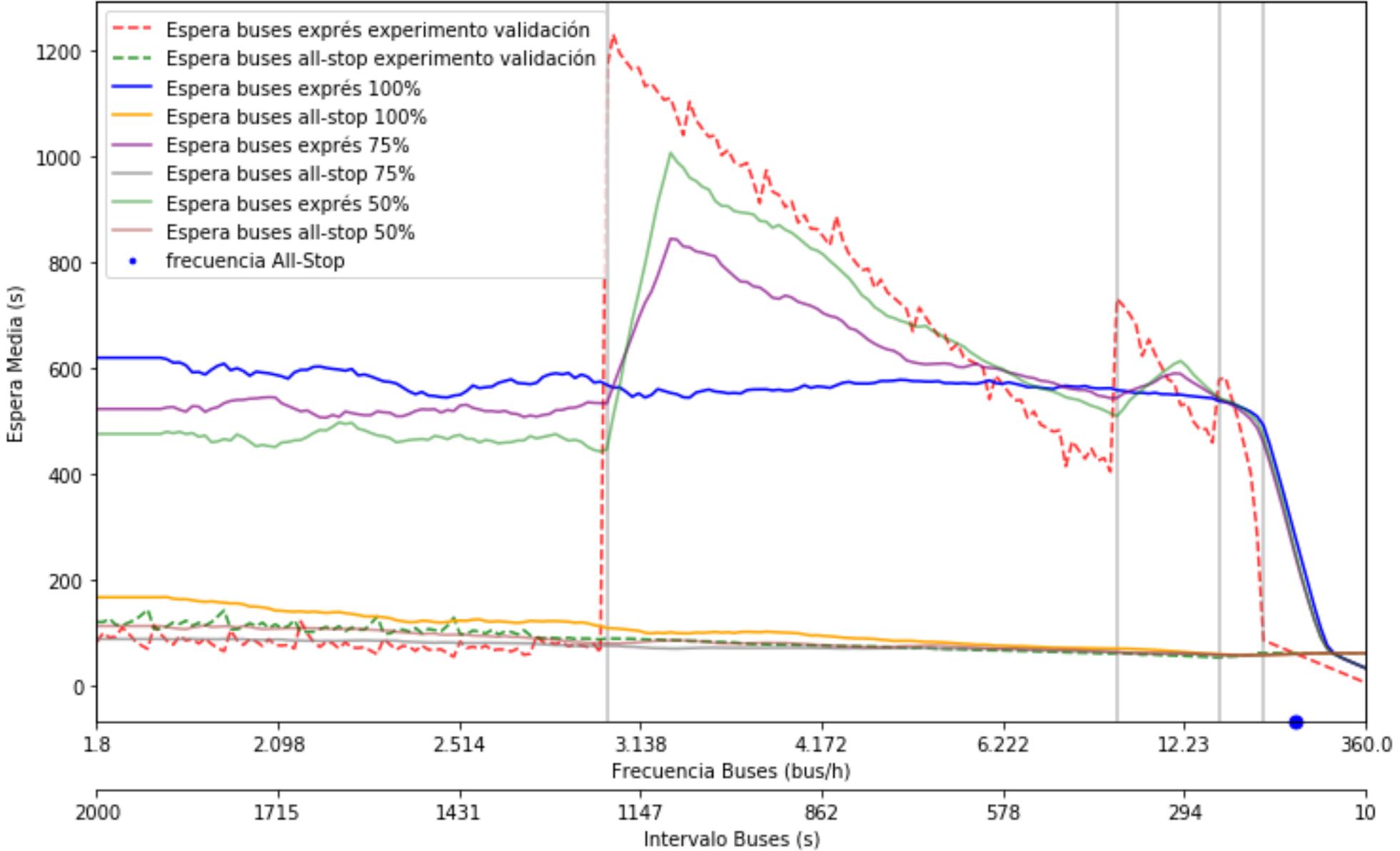


# Experimento 3: usuarios que tienen una app

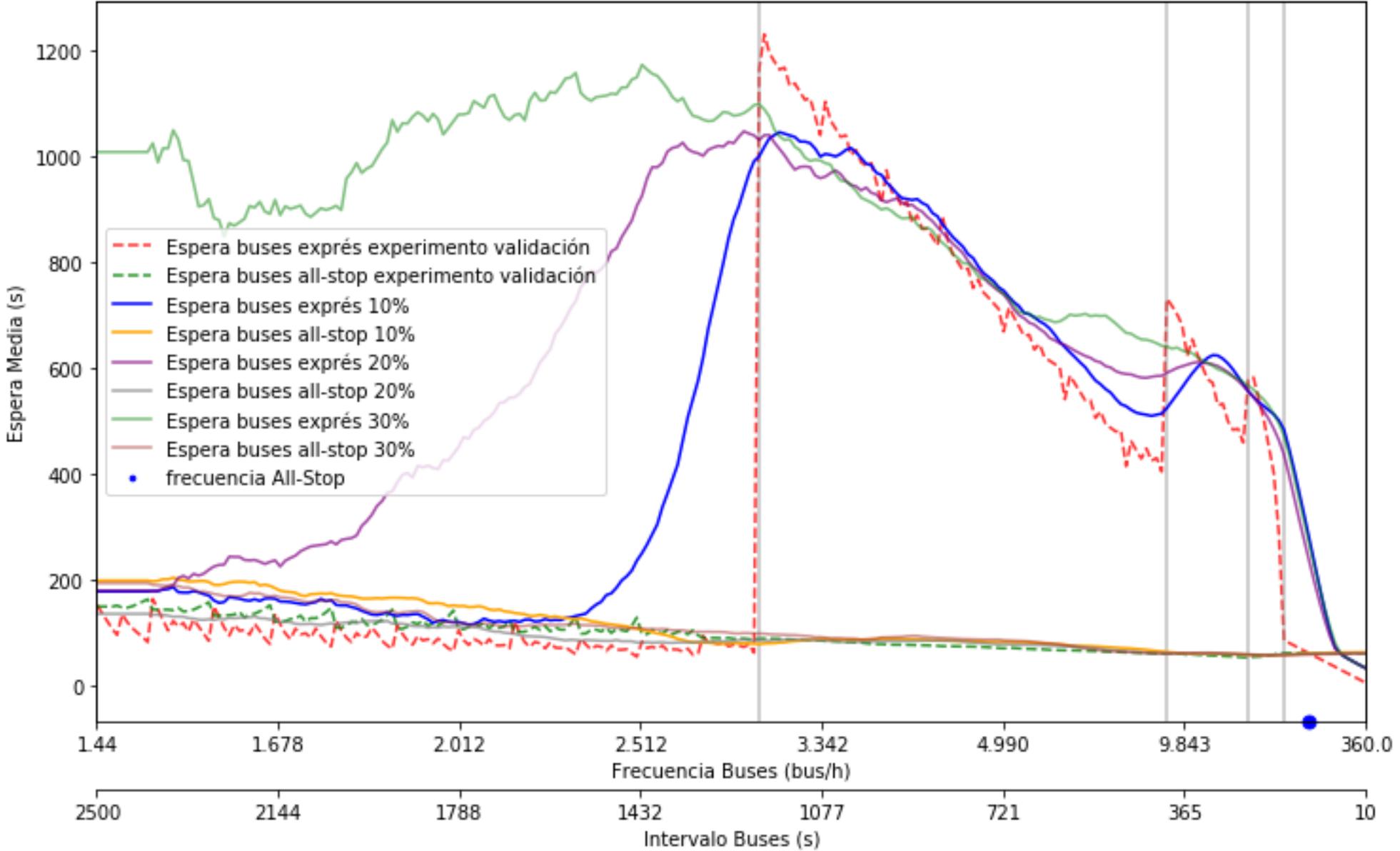


La bajada abrupta del segundo 1320 en la curva roja se debe a los cambios de fila dados porque la cola del bus all-stop bajó de la capacidad de un bus.

# Experimento 3: usuarios que tienen una app



# Experimento 4: usuarios que calculan con error



# Experimento 5: capacidad del paradero

**Si el paradero tuviese una capacidad máxima de gente que puede albergar adentro... ¿qué pasaría?**

# Experimento 5: capacidad del paradero

**Si el paradero tuviese una capacidad máxima de gente que puede albergar adentro... ¿qué pasaría?**

**Se formaría una fila para entrar, que combina usuarios flexibles y cautivos. ¿Qué pasa entonces con los tiempos de espera?**

# Experimento 5: capacidad del paradero

**Si el paradero tuviese una capacidad máxima de gente que puede albergar adentro... ¿qué pasaría?**

**Se formaría una fila para entrar, que combina usuarios flexibles y cautivos. ¿Qué pasa entonces con los tiempos de espera?**

**Se disparan! Ya no dependen de una fila, sino de dos.**

# Experimento 5: capacidad del paradero

**Si el paradero tuviese una capacidad máxima de gente que puede albergar adentro... ¿qué pasaría?**

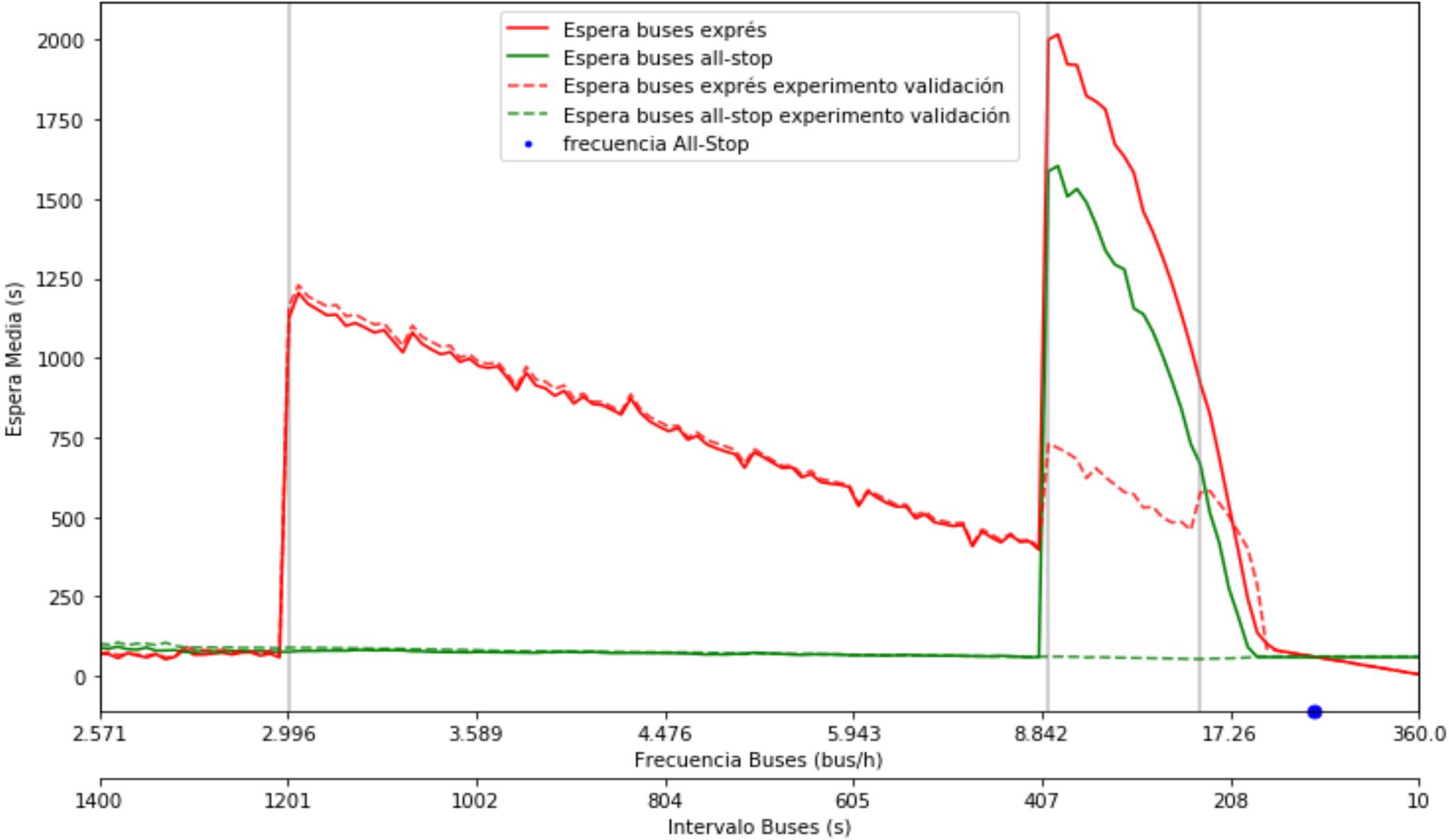
**Se formaría una fila para entrar, que combina usuarios flexibles y cautivos. ¿Qué pasa entonces con los tiempos de espera?**

**Se disparan! Ya no dependen de una fila, sino de dos.**

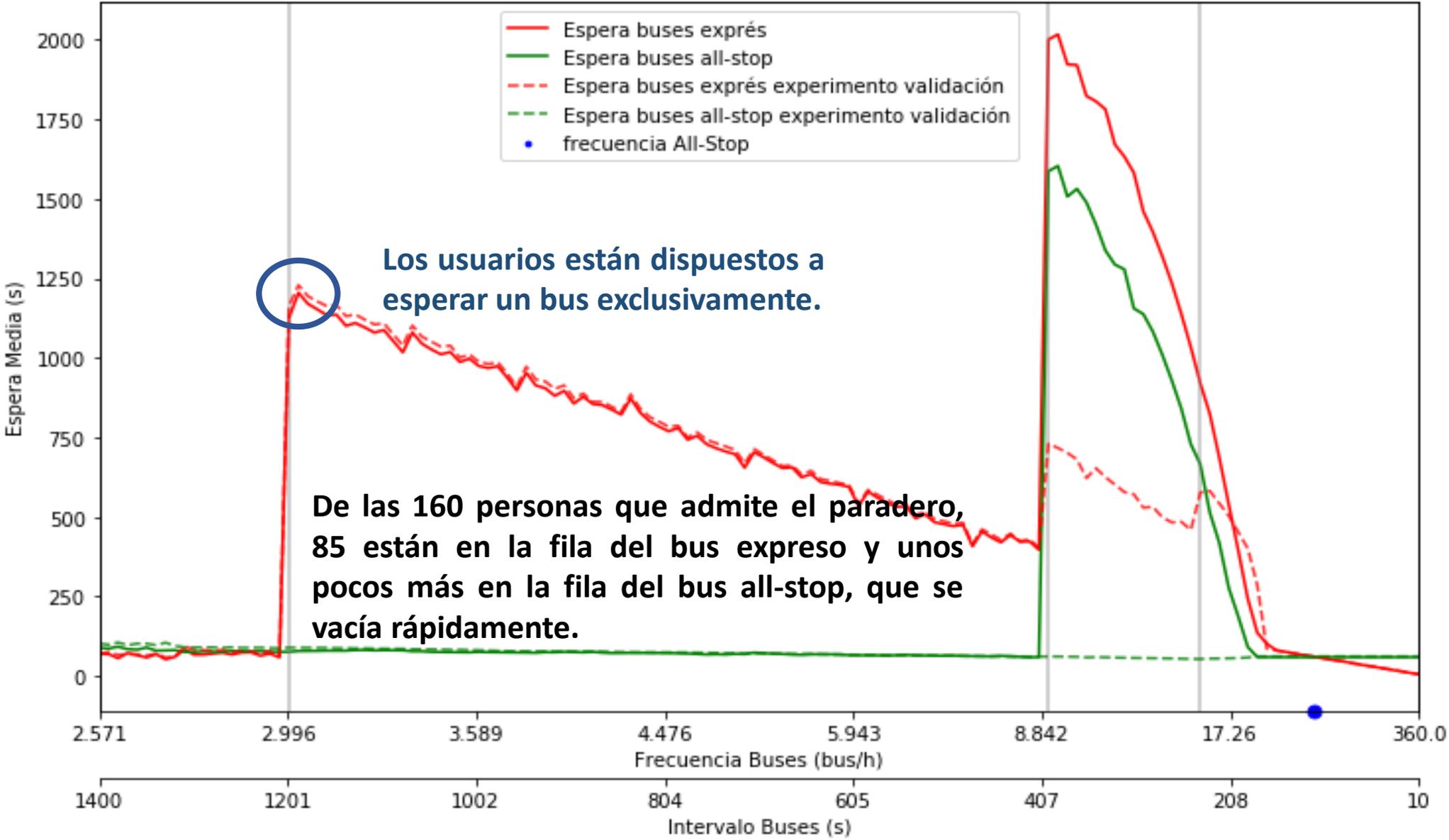
**Vimos que los largos máximos de fila se mueven en intervalos discretos, en función de las capacidades de los buses. Entonces ¿cómo esperaríamos ver el gráfico de la espera media sabiendo esto?**

**Pongamos el ejemplo de que la capacidad de los buses es de 85 pasajeros y la capacidad del paradero es de 160 personas.**

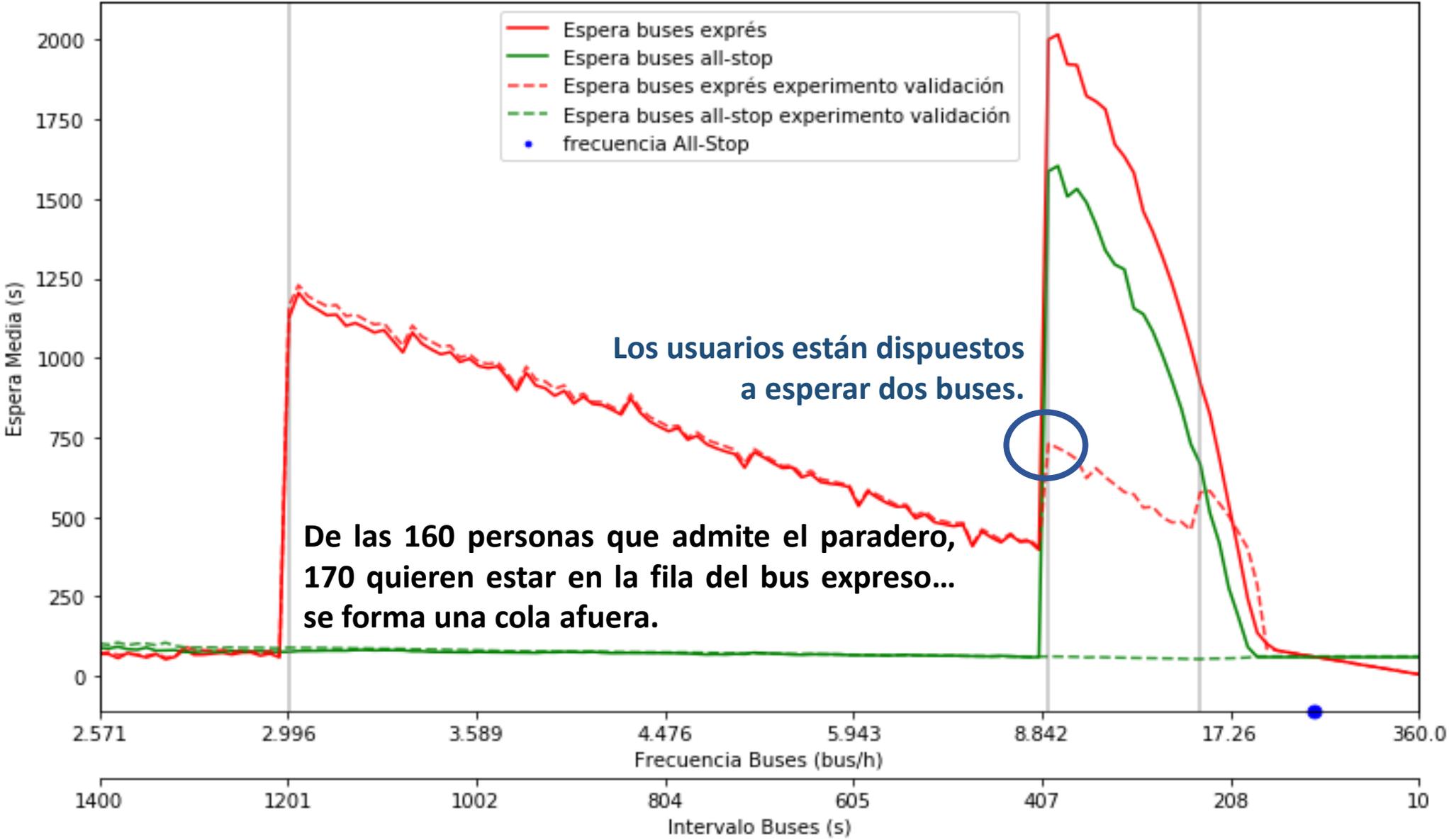
# Experimento 5: capacidad del paradero



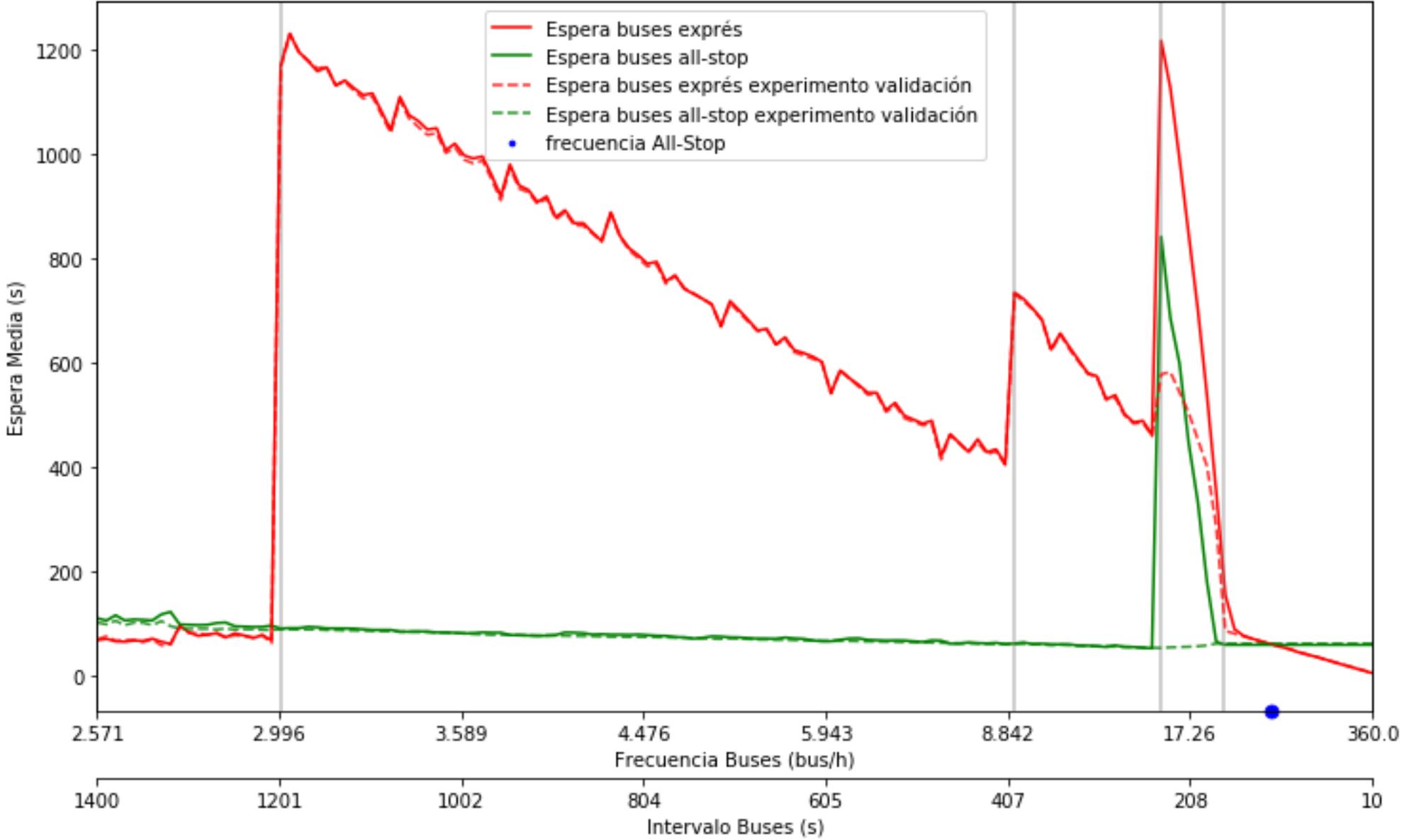
# Experimento 5: capacidad del paradero



# Experimento 5: capacidad del paradero



# Experimento 5: capacidad del paradero



# Conclusiones

Es muy probable que la *Danger Zone* de los servicios expresos exista y esté afectando servicios de BRT en distintas partes.

Estando en la *Danger Zone*, la mayoría de la gente que usa el bus expreso no le saca partido, sino que sale perdiendo.

Para evitar la *Danger Zone* siempre hay dos opciones, disminuir o aumentar el nivel de servicio. Es importante notar que no sólo se evita cambiando las frecuencias de los buses expresos, los buses all-stop juegan un papel muy importante.

Estos resultados deberían ser escalables, incluyendo más servicios (3, 4 5... buses), siendo posible encontrar conclusiones similares. Se abre la oportunidad para hacerlo.

**¡Muchas Gracias!**