

# ***Optimización dinámica del despacho de buses: un enfoque adaptativo a la demanda***

*Martín Del Gordo - 202024239*

*Samuel Rubio - 202123595*

*Javier Barrera - 202014132*





# **ÍNDICE**

- 01 **Introducción**
- 02 **Tipos de problemas en medios de transporte**
- 03 **Preguntas de interés**
- 04 **Planteamiento del problema**
- 05 **Definición del sistema de transporte**
- 06 **Formulación matemática**
- 07 **Restricciones**
- 08 **Resultados**
- 09 **Métodos de aceleración**
- 10 **Cambio de intervalo de tiempo**
- 11 **Conclusiones**

# INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transporte en ciudades como Montería, Bucaramanga, y Barranquilla a pesar de sus mejoras en infraestructura se han encontrado en crisis debido a la ineficiencia operacional en el servicio ofrecido.

## Sistemas tradicionales de despacho

Los sistemas tradicionales están basados en horarios fijos o reglas simples, no logran adaptarse a las variaciones de la demanda ni a las condiciones cambiantes del tráfico.

- Utilización ineficiente de los recursos operativos.
- Insatisfacción de la demanda de pasajeros
- Tiempos de espera prolongados

- Planificación de rutas y recorridos.
- Asignación de horarios.
- Despacho de buses

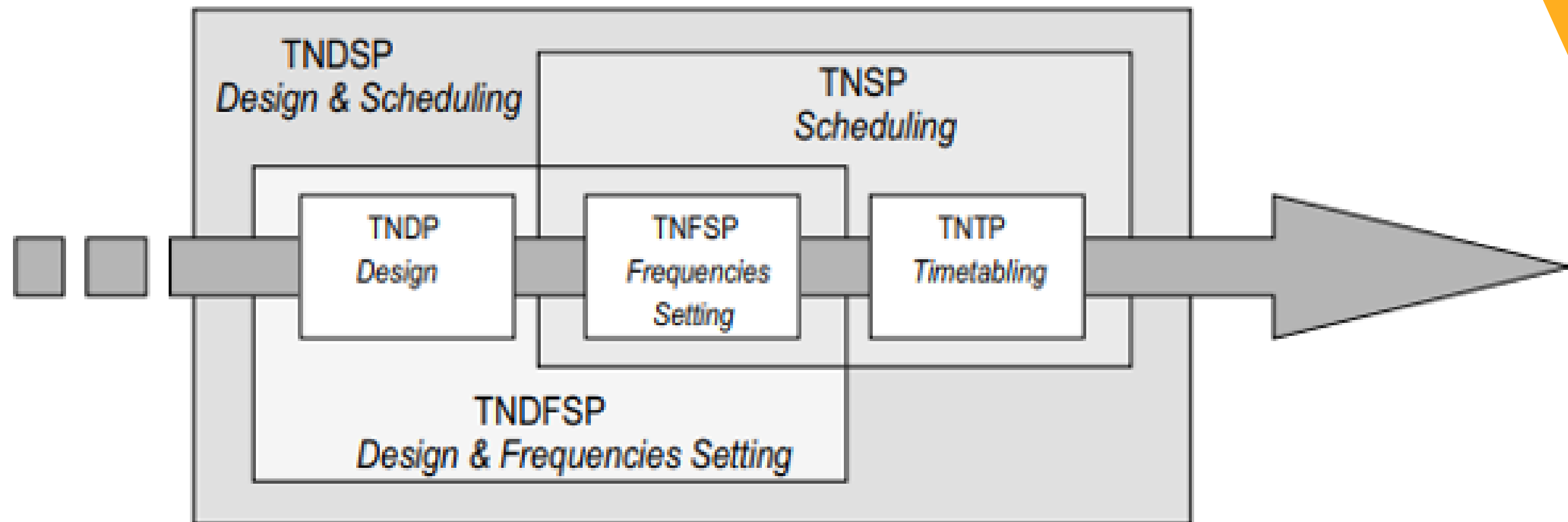
## Modelos en la literatura

Se han desarrollado enfoques variados, tanto exactos como aproximados, que abordan este problema desde distintas perspectivas, integrando herramientas matemáticas, heurísticas e híbridas

- Alta complejidad inherente en sus métodos
- Simplifican la operación real
- Requieren altos costos computacionales



# ***TIPOS DE PROBLEMAS EN MEDIOS DE TRANSPORTE***



## ***PREGUNTAS DE INTERÉS***

¿Cómo **optimizar** la programación del despacho de autobuses para **maximizar** el **desempeño operacional** del sistema?

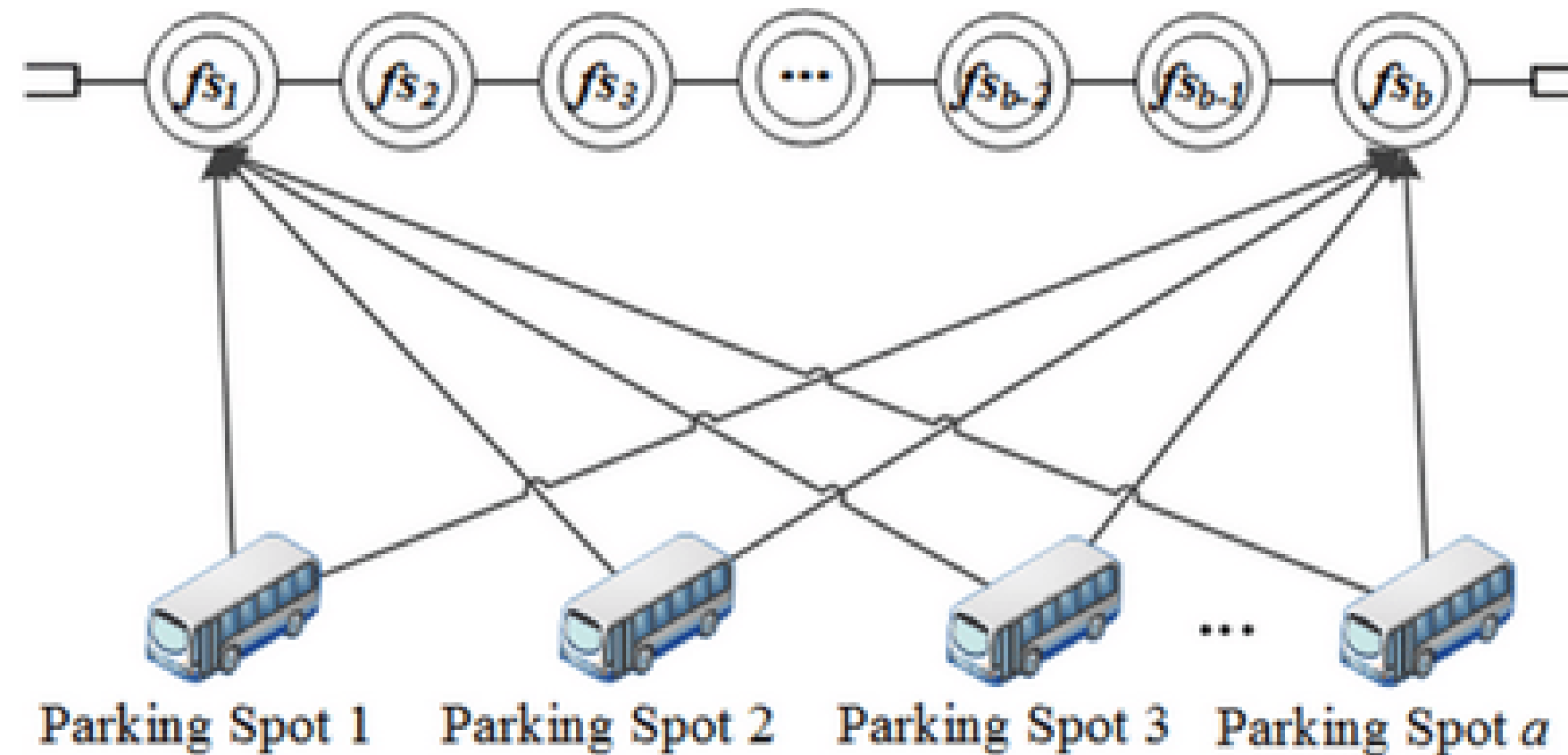
¿Cómo establecer un modelo **computacionalmente eficiente** teniendo en cuenta las condiciones y características de las diferentes rutas de una operación real?

¿Cómo tomar decisiones de despacho de manera **dinámica y proactiva** respondiendo ante las **fluctuaciones de la demanda** durante la operación?



# DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE

1

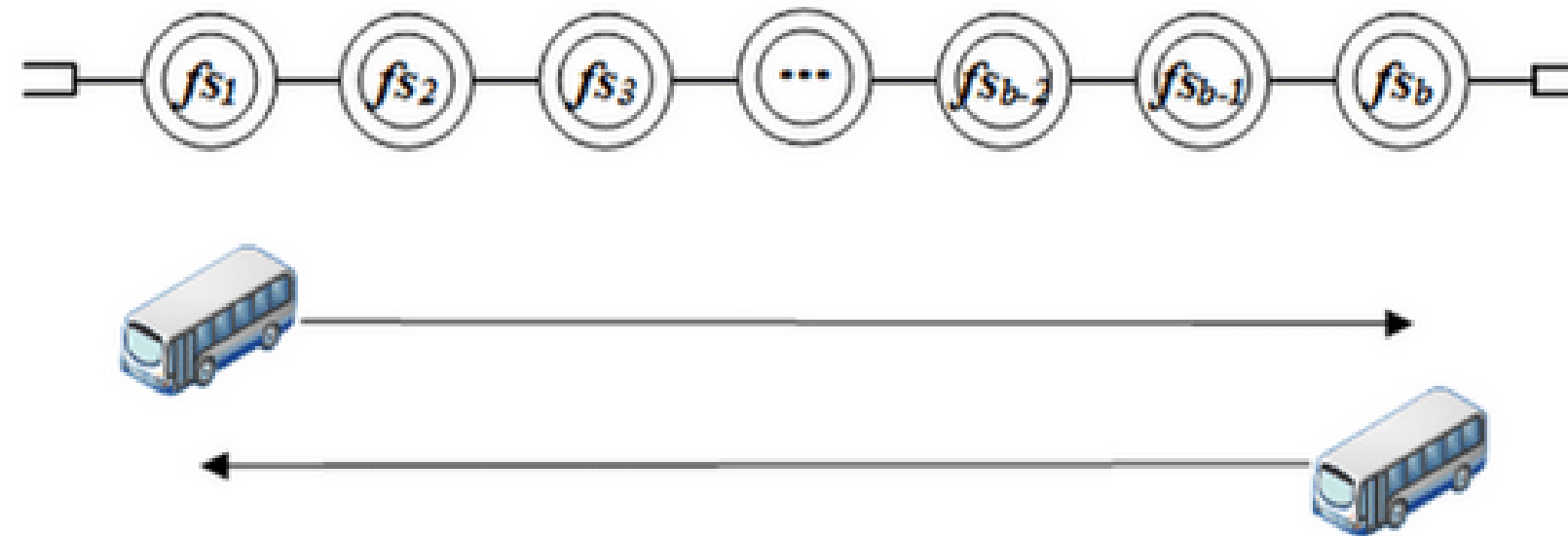


## Inicio de la operación

- Todos los buses de las diferentes rutas inician la operación guardados en un patio común.
- Los buses son despachados desde el patio a alguna cabecera, haciendo un transito en vacío para iniciar sus recorridos para la atención de pasajeros

# DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE

2

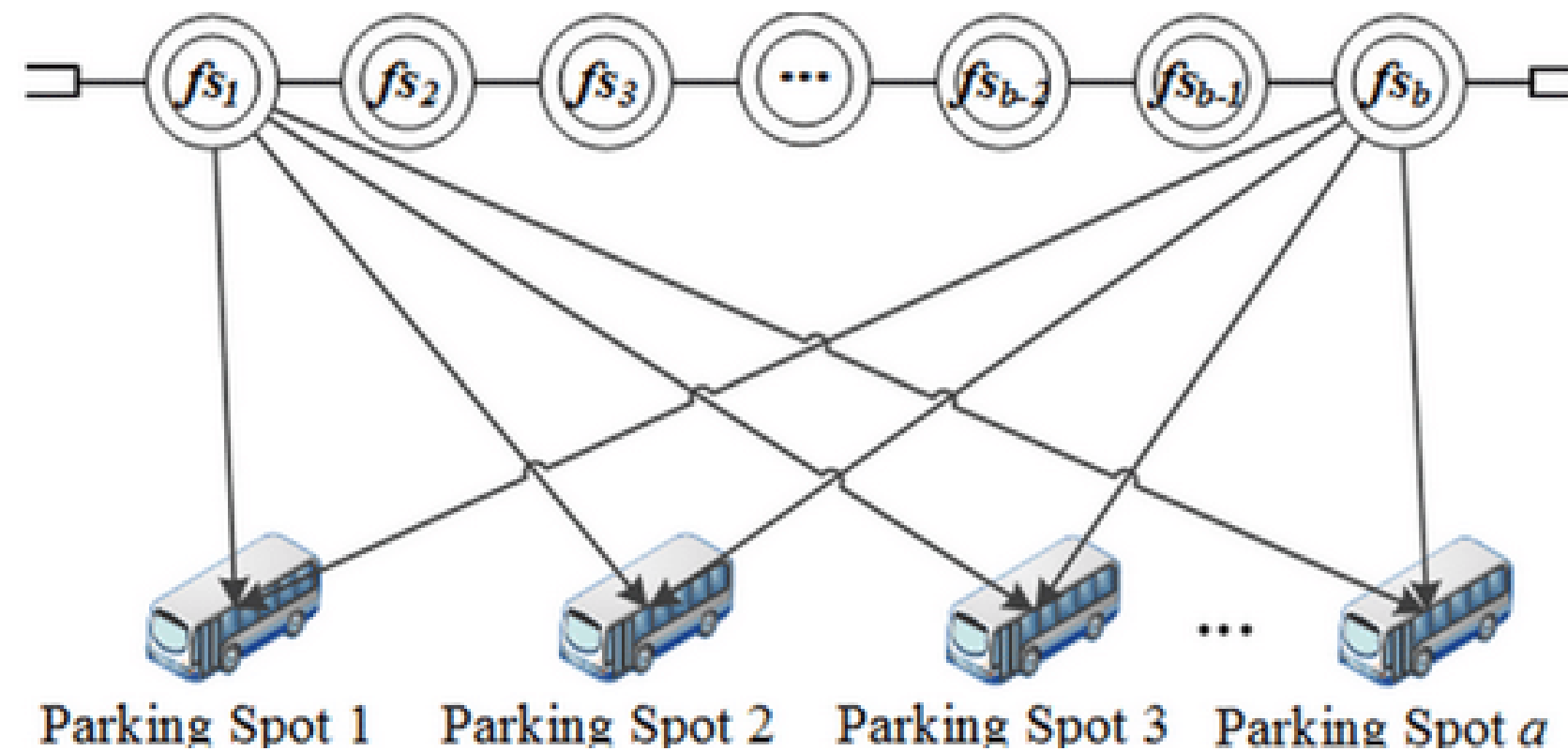


## Durante la operación

- Los buses pueden ser despachados desde cualquiera de las dos cabeceras, y pueden permanecer estáticos en estas esperando a ser despachados.
- Los pasajeros pueden ser recogidos en cualquier punto del recorrido(demanda), siempre que el bus esté en tránsito en el sentido correspondiente.
- Los buses pueden hacer viajes en vacío(sin pasajeros) de una cabecera a otra cabecera o de una cabecera al patio

# DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE

3

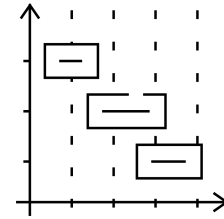


## Fin de la operación

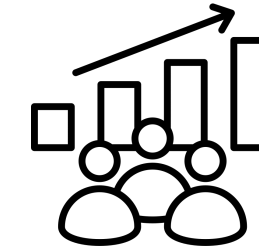
- Los buses pueden mantenerse desde el inicio de la operación o volver durante la operación al patio.
- Los buses al final de la operación deben regresar al patio para ser guardados y alistados para la siguiente jornada



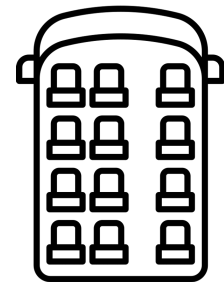
# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



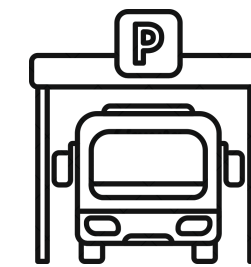
**Intervalos de tiempo:** El sistema de despacho opera en intervalos de 10 minutos



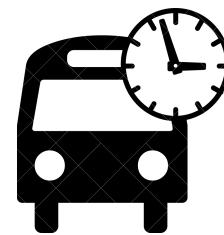
**Demanda en sentido 1 y 2:** demanda de pasajeros pronosticadas en intervalos de tiempo  $t$  para ambos sentidos.



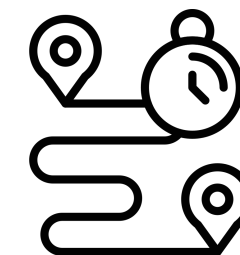
**Capacidad de buses:** cantidad de pasajeros, lo que limita cuántos pasajeros pueden ser atendidos en un solo viaje.



**Tiempo de inicio de servicio:** tiempo que tarda un bus en estar disponible en la cabecera después de salir del patio.



**Tiempos de recorrido:** Se establecen tiempos de recorrido para los dos sentidos de las rutas.



**Tiempo de fin de servicio:** indica cuánto tiempo tarda un bus en estar disponible al ir de alguna cabecera al patio.



The background features two large, solid orange geometric shapes. One is a triangle on the left side, pointing towards the bottom right. The other is a quadrilateral on the right side, pointing towards the bottom left. They meet in the center, leaving a white space where the text is located.

# ***FORMULACIÓN MATEMÁTICA***

# ***SUPUESTOS***

**La demanda en cada intervalo de tiempo y en cada cabecera es conocida**

**Los buses operan entre dos cabeceras sin paradas intermedias**

**Los tiempos de recorrido de las rutas son constantes y conocidos**

**Todos lo buses tienen la misma capacidad**

**La cantidad de buses que deben ser asignados es fija**

**Los buses operan en un horario fijo que va de 5:00 am a 9:00 pm**

**Los costos de operación y los ingresos por pasajero son constantes en el tiempo**

# Nodos

Están compuestos por todas las tuplas  $(l, t)$  tal que:  $l \in L$

- **$l \in L$ .** Esta posición representa una ubicación. Este puede ser un patio de la empresa o la cabecera de una determinada ruta
- **$t \in T$ .** Acá encontramos el instante de tiempo específico en el que un bus se encuentra en la ubicación  $l$ .

# Arcos

Los arcos de nuestro modelo pueden ser clasificados en dos categorías:

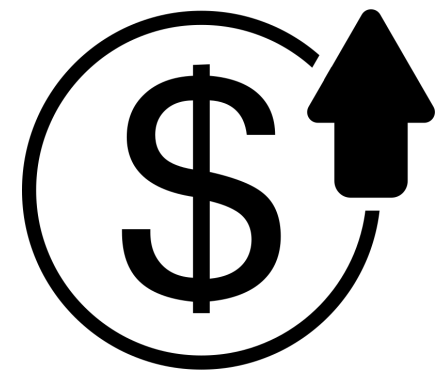
- **Arcos de movimiento:** Representan los desplazamientos que hace un bus de una ubicación a otra en un intervalo de tiempo específico (Pueden ser en servicio o en vacío).
- **Arcos de permanencia:** Se usan para explicar la permanencia de un bus en una ubicación de  $t$  a  $t + 1$ . Son especialmente útiles para cuando un bus espera en una cabecera o está fuera de servicio en un patio.

Conjuntos	
$K$	Conjunto de buses disponibles, indexado por $k$ , con $k = 1, 2, \dots, B$ .
$T$	Conjunto de intervalos de tiempo discretos, indexado por $t$ .
$L$	Conjunto de ubicaciones, con $L = \{P, C1, C2\}$ .
$S$	Conjunto de sentidos de servicio, con $S = \{1, 2\}$ .

Parámetros	
$B$	Número total de buses disponibles.
$C$	Capacidad máxima de cada bus (en número de pasajeros).
$D_{s,t}$	Demanda de pasajeros en el sentido $s$ durante el intervalo $t$ .
$T_{l,l'}$	Tiempo de viaje en intervalos desde la ubicación $l$ hasta $l'$ . Ejemplo: $T_{C1,C2}$ es el tiempo de viaje de $C1$ a $C2$ .
$c_{\text{mov}}$	Costo fijo asociado al movimiento de un bus entre ubicaciones.
$c_{\text{bus}}$	Costo operativo por mantener un bus en servicio en cada intervalo.
$c_{\text{ingreso}}$	Ingreso generado por cada pasajero transportado.
$c_{\text{espera}}$	Costo de permanencia del bus en las cabeceras en cada intervalo de tiempo.
$\delta_{(l,l'),s}$	Parámetro indicador que toma el valor 1 si el movimiento entre $l$ y $l'$ corresponde al sentido $s$ , y 0 en caso contrario.

Variables de decisión	
$x_{k,l,t,l',t'}$	Toma el valor 1 si el bus $k$ se mueve de la ubicación $l$ en el intervalo $t$ hacia $l'$ en el intervalo $t'$ , y 0 en caso contrario.
$L_{k,l,t}$	Toma el valor 1 si el bus $k$ está en la ubicación $l$ en el tiempo $t$ , y 0 en caso contrario.
$z_{k,t}$	Toma el valor 1 si el bus $k$ está en operación (no en el patio) en el tiempo $t$ , y 0 en caso contrario.
$p_{k,s,t}$	Número de pasajeros transportados en el sentido $s$ por el bus $k$ en el intervalo $t$ .
$y_{s,t}$	Demanda no satisfecha en el sentido $s$ en el intervalo $t$ .

## **FUNCIÓN OBJETIVO**



$$\text{mín } Z = \underbrace{\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} c_{\text{bus}} \cdot z_{k,t}}_{\text{Costo de mantener los buses}} + \underbrace{\sum_{k \in K} \sum_{\substack{l, l' \in L \\ t, t' \in T}} c_{l, l'} \cdot x_{k, l, t, l', t'}}_{\text{Costo de desplazamiento de los buses}} - c_{\text{ingreso}} \underbrace{\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} p_{k, s, t}}_{\text{Ingresos por transportar pasajeros}}$$

Costo de  
mantener los  
buses

Costo de  
desplazamiento  
de los buses

Ingresos por  
transportar  
pasajeros

# ***RESTRICCIONES***

## Ubicación inicial de los buses

Esta restricción busca asegurar que todos los buses se encuentren en el patio en el tiempo inicial

$$L_{k,P,0} = 1, \quad \forall k \in K$$



## Única ubicación en el tiempo

Esta garantiza que un bus sólo puede estar en una sola ubicación en cada instante de tiempo. Asegura la integridad de la asignación de buses

$$\sum_{l \in L} L_{k,l,t} \leq 1, \quad \forall k \in K, \forall t \in T$$

## Actualización de la ubicación de los buses

Esta restricción asegura que la presencia del bus en cada ubicación se actualice correctamente según sus movimientos

$$L_{k,l,t+1} = L_{k,l,t} - \sum_{\substack{l' \in L \\ t' = t + T_{l,l'}}} x_{k,l,t,l',t'} + \sum_{\substack{l' \in L \\ t'' = t+1 - T_{l',l}}} x_{k,l',t'',l,t+1}, \quad \forall k \in K, \forall l \in L, \forall t \in T$$

## Movimiento permitido solo si está en la ubicación

Garantiza que un bus solo puede moverse desde una ubicación  $l$  en un tiempo  $t$  si realmente está presente en esa ubicación en ese tiempo

$$x_{k,l,t,l',t'} \leq L_{k,l,t}, \quad \forall k \in K, \forall l, l' \in L, \forall t, t' \in T$$

### Definición de la variable $z_{k,t}$

Esta variable toma valor de 1 si el bus  $k$  se encuentra fuera del patio (en servicio) durante el tiempo  $t$ , y 0 de lo contrario. Es por esto que depende de la variable  $L$ .

$$z_{k,t} = 1 - L_{k,P,t}, \quad \forall k \in K, \forall t \in T$$

## No exceder la capacidad acumulada

Asegura que el total de pasajeros transportados por el bus  $k$  en el sentido  $s$  hasta el tiempo  $t$  no exceda la capacidad acumulada del bus en ese sentido. Se consideran todos los viajes realizados hasta ese momento

$$\sum_{\tau=0}^t p_{k,s,\tau} \leq C \cdot \sum_{\substack{l,l' \in L \\ t' \leq t}} \delta_{(l,l'),s} \cdot x_{k,l,t',l',t'+T_{l,l'}}, \quad \forall k \in K, \forall s \in S, \forall t \in T$$

## Cobertura de la demanda total

Asegura que la demanda total de pasajeros en cada sentido  $s$  y tiempo  $t$  sea contabilizada, ya sea atendida por los buses o registrada como no satisfecha

$$\sum_{k \in K} p_{k,s,t} + y_{s,t} = D_{s,t}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T$$

## Consistencia entre el movimiento del bus y la atención de pasajeros

Esta restricción garantiza que un pasajero solo puede ser transportado si el bus está realizando el movimiento en el sentido e intervalo de tiempo correspondiente

$$p_{k,s,t} \leq C \cdot \sum_{\substack{l,l' \in L \\ t' \in T}} \delta_{(l,l'),s} \cdot x_{k,l,t',l',t'+T_{l,l'}} \cdot \mathbf{1}_{[t' \leq t < t'+T_{l,l'}]}, \quad \forall k \in K, \forall s \in S, \forall t \in T$$

## Capacidad del bus en cada intervalo

Limita la cantidad total de pasajeros que un bus puede transportar en un intervalo de tiempo  $t$  a su capacidad máxima  $C$ , siempre y cuando el bus esté en operación ( $z_{k,t} = 1$ ).

$$\sum_{s \in S} p_{k,s,t} \leq C \cdot z_{k,t}, \quad \forall k \in K, \forall t \in T$$



## Naturaleza de las variables

$$x_{k,l,t,l',t'} \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, \forall l, l' \in L, \forall t, t' \in T$$

$$L_{k,l,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, \forall l \in L, \forall t \in T$$

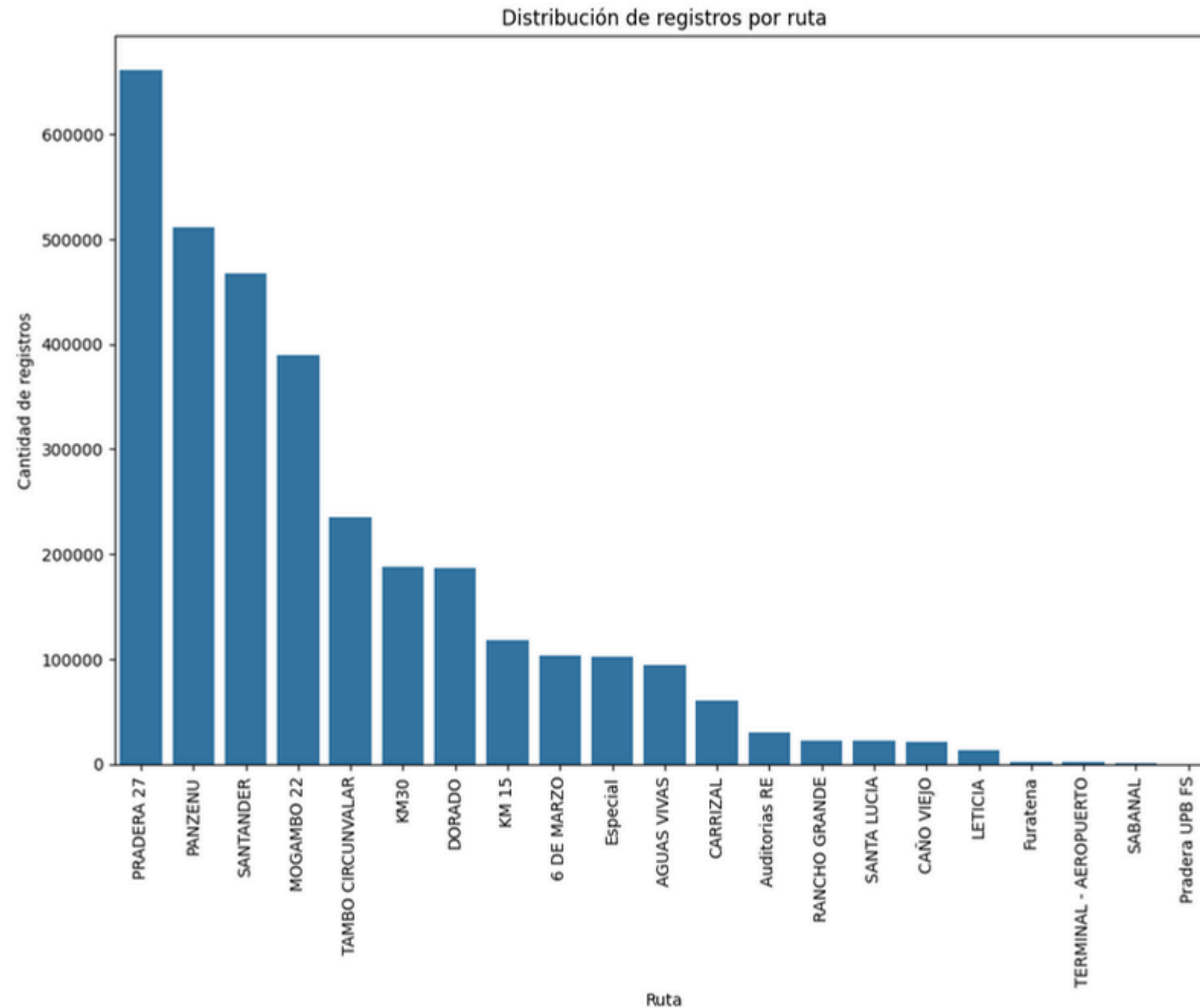
$$z_{k,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, \forall t \in T$$

$$p_{k,s,t} \geq 0, \quad \forall k \in K, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$y_{s,t} \geq 0, \quad \forall s \in S, \forall t \in T$$

# ***RESULTADOS***

# Selección de instancias

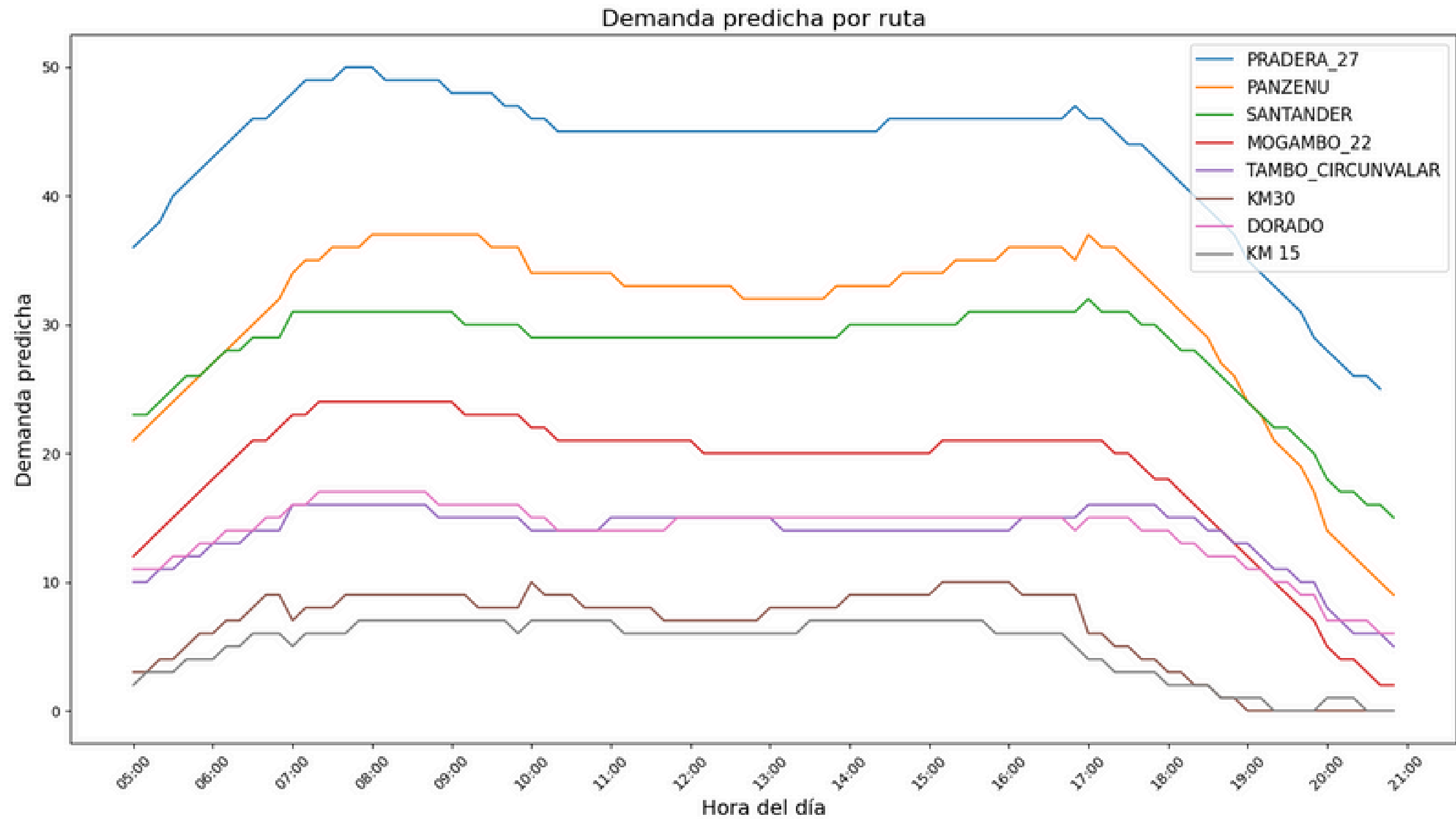


- Pradera 27
- Panzenu
- Santander
- Mogambo 22
- Tambo Circumbalar
- Dorado
- km 15
- km 30

## Parámetros del caso de estudio

Ruta	Tiempo C1 → C2 (min)	Tiempo C2 → C1 (min)	Cantidad de buses
Dorado	30	30	7
Km 15	24	22	2
Km 30	40	34	1
Mogambo 22	28	29	7
Panzenu	39	36	7
Pradera 27	41	39	8
Santander	49	47	7
Tambo Circunvalar	39	34	5

## Parámetros del caso de estudio



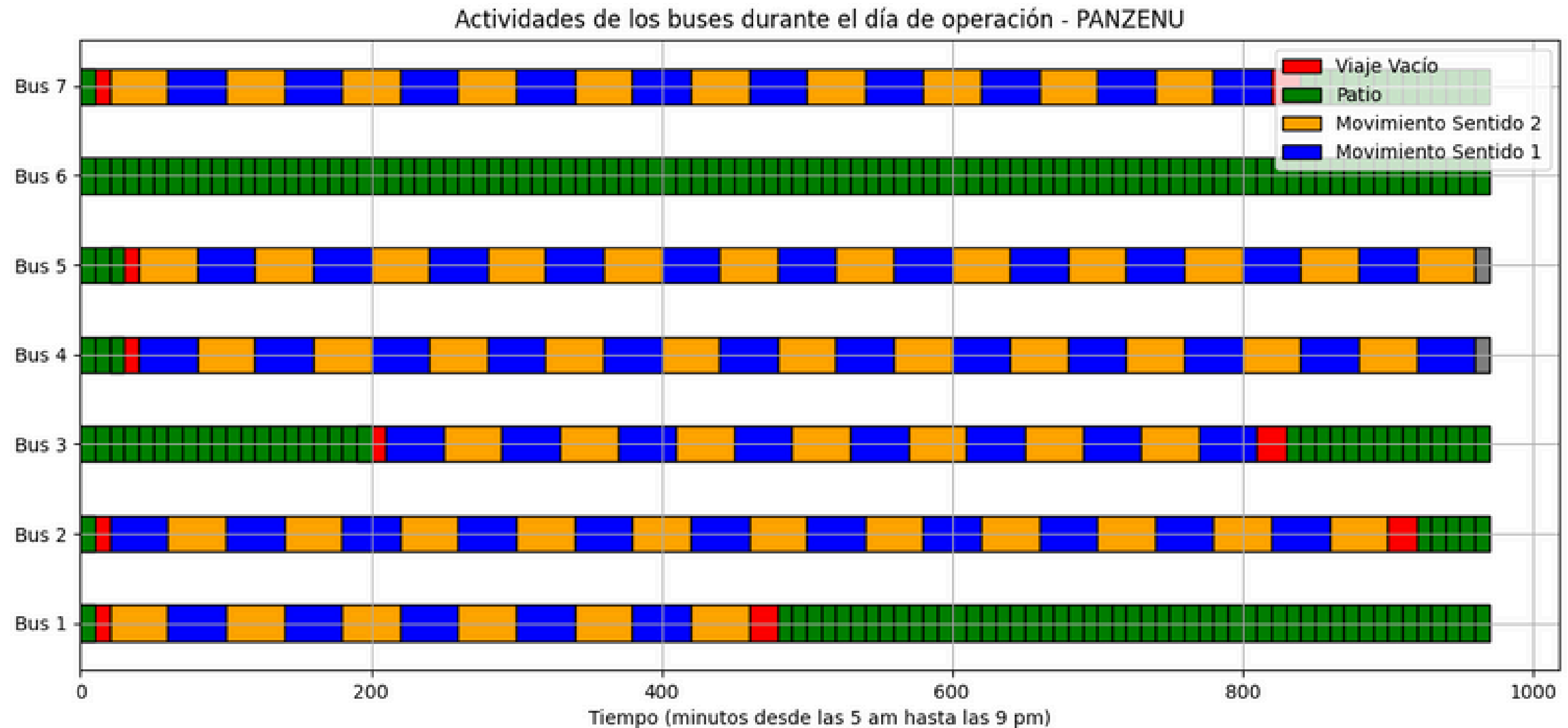
# Utilidad obtenida y desempeño computacional

Ruta	Utilidad	Gap MIP (%)	Tiempo ejecución (s)	# Variables	# Restricciones
Pradera 27	10811.0	0.49	177.91	10906	14010
Panzenu	8088.0	0.77	3600.09	9574	12290
Santander	6852.0	0.24	31.94	9560	12276
Mogambo 22	5131.0	0.38	821.59	9588	12304
Tambo	3553.0	0.49	141.29	6894	8834
Km 30	605.0	0.08	0.17	1534	1922
Dorado	3632.0	0.00	14.66	9588	12304
Km 15	522.0	0.22	1.25	2878	3654

Las soluciones alcanzadas son muy cercanas a las óptimas en cada ruta

Las utilidades obtenidas evidencian una relación directa con la demanda de pasajeros de cada ruta.

La única ruta en alcanzar una solución óptima fue Dorado, las demás no.



- Todos los buses salen del **patio** con un **viaje vacío**
- Existe un bus que permanece siempre en **patio**, por lo que este sobra en la **asignación**

# Métricas de desempeño de cada instancia

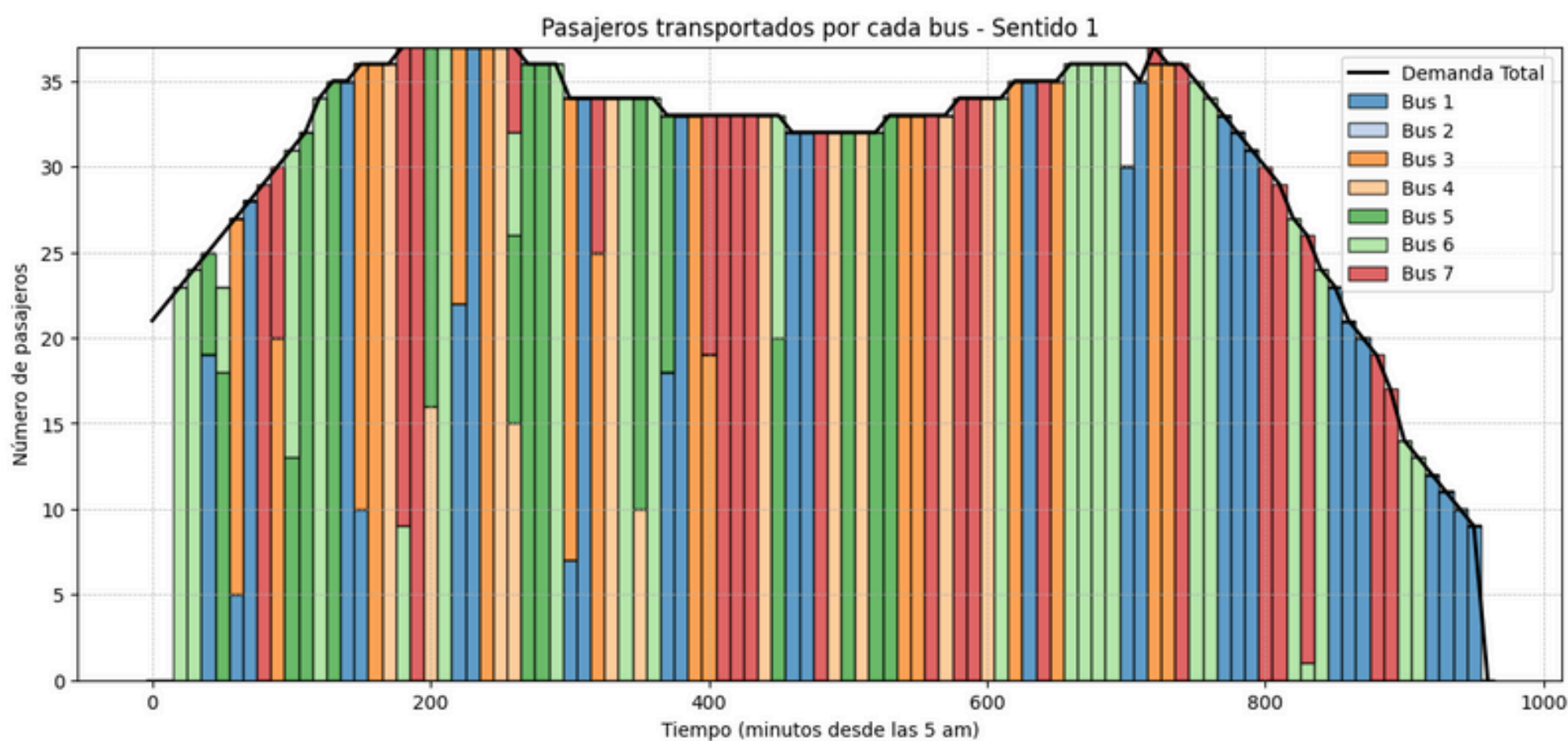
Ruta	Nivel de servicio (%)	Pasajeros transportados	Viajes realizados	Km recorridos	Utilización de la flota (%)	IPK	Capacidad usada bus (%)
Pradera 27	97.49	8033	166	3256	96.91	2.47	92.97
Panzenu	98.55	5844	124	2394	82.53	2.44	89.89
Santander	98.29	5296	110	2142	82.76	2.47	92.38
Mogambo 22	98.38	3518	76	1512	40.26	2.33	88.36
Tambo	98.37	2599	56	1092	56.79	2.38	86.76
Km 30	48.56	605	21	400	96.20	1.51	55.40
Dorado	97.90	2616	64	1302	27.68	2.01	78.61
Km 15	88.68	846	48	924	95.65	0.92	33.89

El nivel de servicio global supera el 97% en la mayoría de las rutas

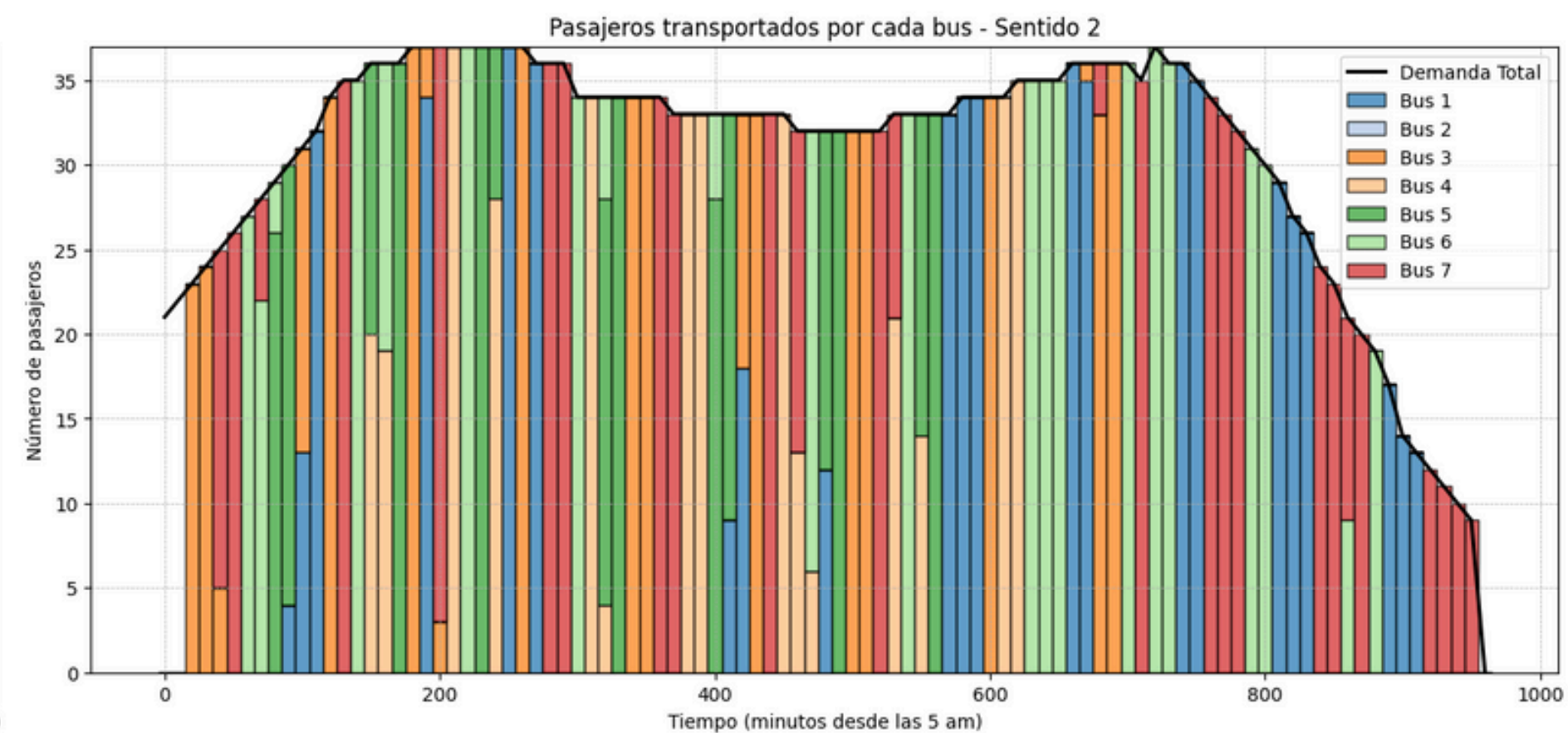
Los autobuses operan con una alta ocupación para las rutas de alta demanda

Los buses de las rutas km 30, km 15, y km 30, son las que alcanzan utilizaciones mas altas





- En casi todo momento, se cubre el total de la **demanda** de cada ruta



- Evidentemente, en el momento cero **no se puede cubrir demanda** (pues los buses deben salir del patio)

The image features a white background with two large orange geometric shapes in the corners. On the left, an orange triangle points towards the bottom-left corner. On the right, an orange triangle points towards the top-right corner.

# ***MÉTODOS DE ACELERACIÓN***

# Cortes y Tuning

- MipSepCuts
- ImpliedCuts
- NetworkCuts
- FlowCoverCuts
- LiftProjectCuts
- CliqueCuts
- MiPfocus

Tabla 5: Tiempos de ejecución de rutas obtenidos por diferentes parámetros (minutos)

Ruta	Default	MSC,1	MSC,2	IC,1	IC,2	NC,1	NC,2	FCC,1	FCC,2	LPC,1	LPC,2	CC,1	CC,2	MIPF,1	MIPF,2	Tuning*
Pradera 27	2.11	3.11	2.06	2.08	2.54	1.98	2.53	2.01	4.39	1.63	1.63	2.06	2.05	2.99	60.00	2.10
Panzenu	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
Santander	1.07	0.76	0.55	0.52	0.73	0.55	0.73	0.54	0.50	0.79	0.79	0.55	0.54	0.52	0.86	0.20
Mogambo	17.18	23.19	16.39	15.89	18.93	16.11	17.89	17.13	16.30	16.56	16.56	16.38	16.57	34.51	38.22	16.28
Tambo	2.09	2.26	1.73	1.68	2.02	1.69	1.69	1.74	1.86	2.14	2.14	1.72	1.80	3.93	0.74	0.11
KM30	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Dorado	0.44	0.50	0.34	0.26	0.41	0.34	0.31	0.34	0.32	0.33	0.33	0.33	0.31	0.46	0.09	0.01
KM15	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.00
Total	82.93	89.86	81.10	80.47	84.66	80.71	83.18	81.80	83.40	81.49	81.49	81.06	81.30	102.46	159.93	78.70
GAP de Mejora	0 %	8 %	-2 %	-3 %	2 %	-3 %	0 %	-1 %	1 %	-2 %	-2 %	-2 %	-2 %	24 %	93 %	-5 %

Tabla 6: GAP para diferentes rutas y parámetros

Ruta	Default	MSC,1	MSC,2	IC,1	IC,2	NC,1	NC,2	FCC,1	FCC,2	LPC,1	LPC,2	CC,1	CC,2	MIPF,1	MIPF,2	Tuning*
Pradera 27	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.49	0.49	0.50	0.50	0.50	0.48	0.51	0.47
Panzenu	0.75	0.75	0.74	0.74	0.75	0.74	0.75	0.64	0.71	0.65	0.71	0.75	0.64	0.82	0.65	0.74
Santander	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.39	0.39	0.24
Mogambo	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.47	0.50	0.38	0.47	0.50	0.49	0.50	0.50	0.50
Tambo	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.48	0.44	0.49	0.29	0.49	0.48	0.50	0.36	0.48
KM30	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.00	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00
Dorado	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KM15	0.22	0.22	0.21	0.22	0.21	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.36	0.22	0.22	0.50	0.38	0.19
Gap Promedio	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.33	0.34	0.32	0.32	0.35	0.33	0.41	0.35	0.33

## Mejores Combinaciones

- MipSepCuts
- ImpliedCuts
- NetworkCuts
- FlowCoverCuts
- LiftProjectCuts
- CliqueCuts

Parámetro	Comb 1	Comb 2	Comb 3	Comb 4
MipSepCuts	2	2	2	2
ImpliedCut	1	1	1	1
NetworkCut	1	1	1	1
FlowCoverCut	1	1	1	1
LiftProjectCut	1	1	2	2
CliqueCuts	1	2	1	2

# Evaluación Combinaciones

Combinación 1

La Combinación 1 es la configuración más eficiente, con una reducción del tiempo total del 12.46% y un mejor GAP promedio frente al modelo Default.

Tabla 8: Tiempos de ejecución de rutas obtenidos por diferentes combinaciones (minutos)

Tiempo	Default	Comb 1	Comb 2	Comb 3	Comb 4	Tuning*
Pradera 27	2.11	2.68	3.15	1.27	1.28	2.10
Panzenu	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
Santander	1.07	0.52	0.55	0.74	0.81	0.20
Mogambo	17.18	7.33	11.67	17.07	17.59	16.28
Tambo	2.09	1.75	2.33	2.61	2.49	0.11
KM30	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
Dorado	0.44	0.29	0.48	0.40	0.41	0.01
KM15	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.00
Total	82.93	72.59	78.22	82.13	82.62	78.70
GAP de Mejora	0.00	-12.46 %	-5.67 %	-0.96 %	-0.37 %	-5.09 %

Tabla 9: GAP (en porcentaje) para diferentes rutas y combinaciones

Tiempo	Base	Comb 1	Comb 2	Comb 3	Comb 4	Tuning*
Pradera 27	0,5	0,5	0,48	0,5	0,5	0,47
Panzenu	0,75	0,65	0,65	0,7	0,71	0,74
Santander	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Mogambo	0,5	0,38	0,38	0,49	0,49	0,5
Tambo	0,49	0,49	0,48	0,29	0,49	0,48
KM30	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dorado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KM15	0,22	0,22	0,22	0,36	0,36	0,19
GAP Promedio	0,35	0,31	0,31	0,32	0,35	0,33



# CONCLUSIONES ACCELERACIÓN

## Tipos de Cortes

Observando que la combinación 1 es la mejor se puede evidenciar que los mejores parámetros son de cortes moderados

## Optimización Clave

Parámetros como LiftProjectCuts y CliqueCuts fueron importantes, adaptándose bien a la naturaleza del problema de flujo en redes al poder tomar ambos valores de su parámetro.

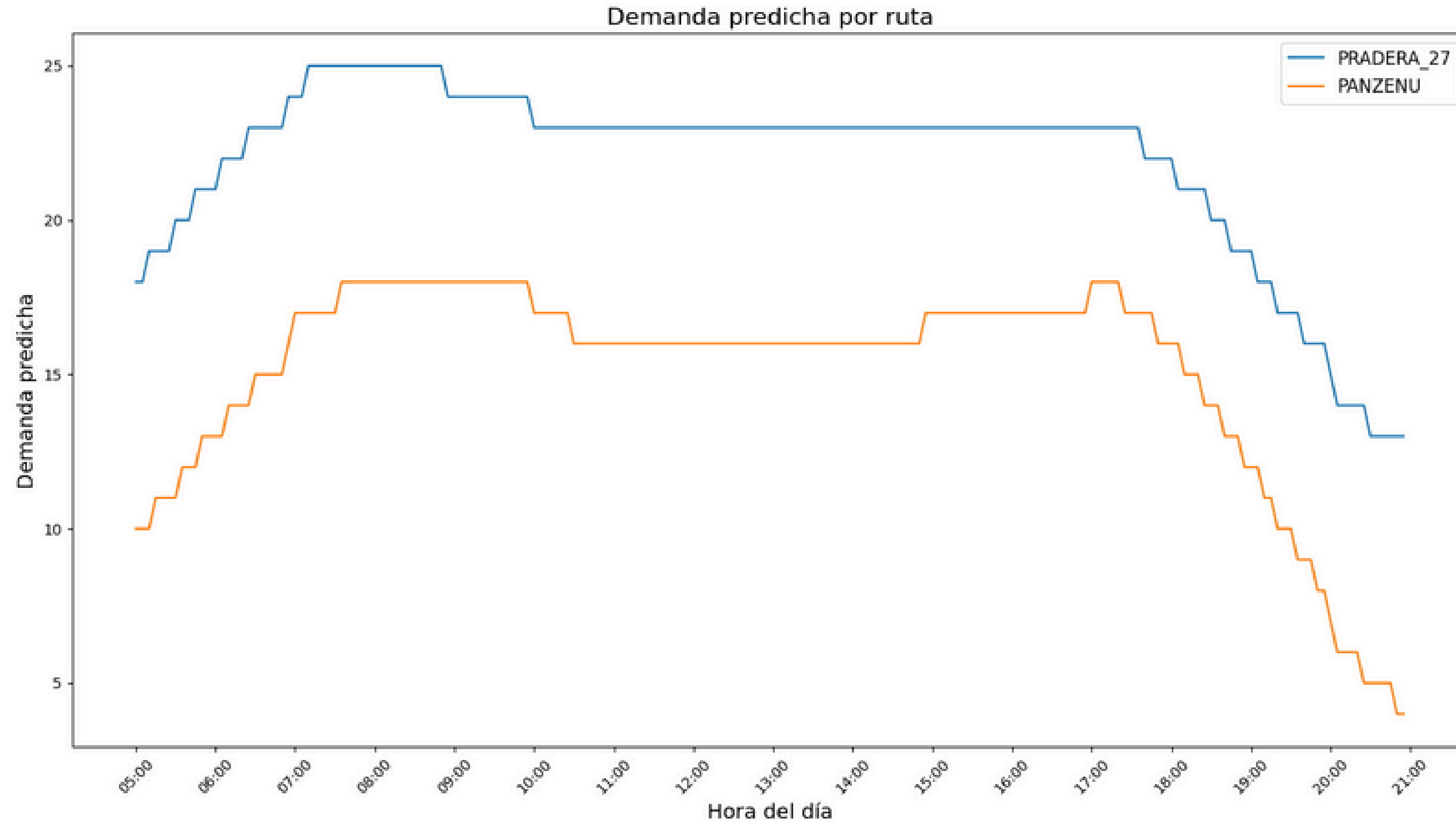
## Variabilidad entre rutas

Rutas como Panzenu requieren estrategias específicas debido a su alta complejidad, mientras que rutas como Santander y Dorado son más fáciles de resolver.

The background features two large orange geometric shapes in the corners: a triangle on the top-left and a quadrilateral on the top-right, both pointing towards the center of the slide.

# ***CAMBIO EN EL INTERVALO DE TIEMPO***

**¿ Qué pasa si se reduce el intervalo temporal de las predicciones y la toma de decisiones?**





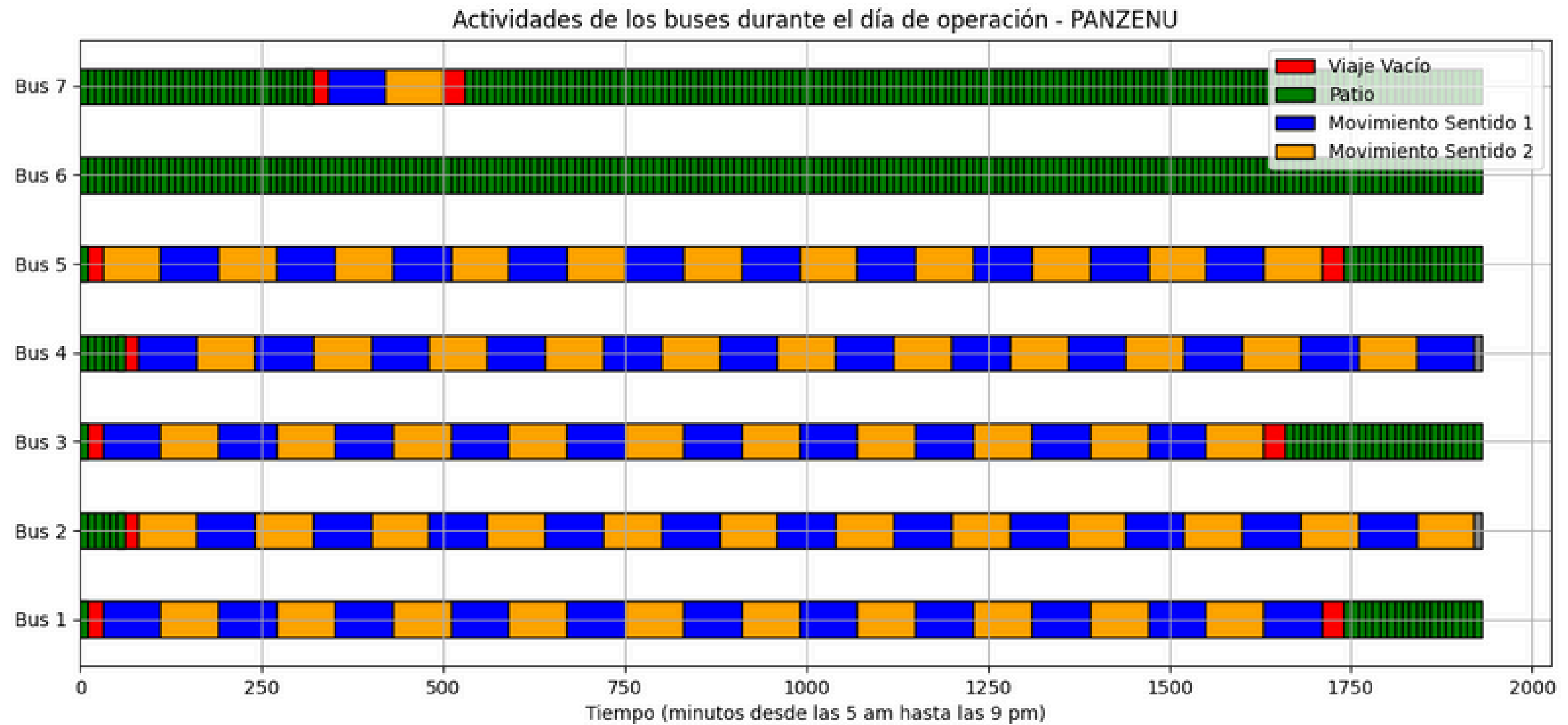
## EFEECTO DEL INTERVALO TEMPORAL

Ruta	Utilidad	Gap MIP (%)	Tiempo de ejecución (s)
Pradera 27	7933	0.59	3600.13
Panzenu	5658	1.15	3600.14

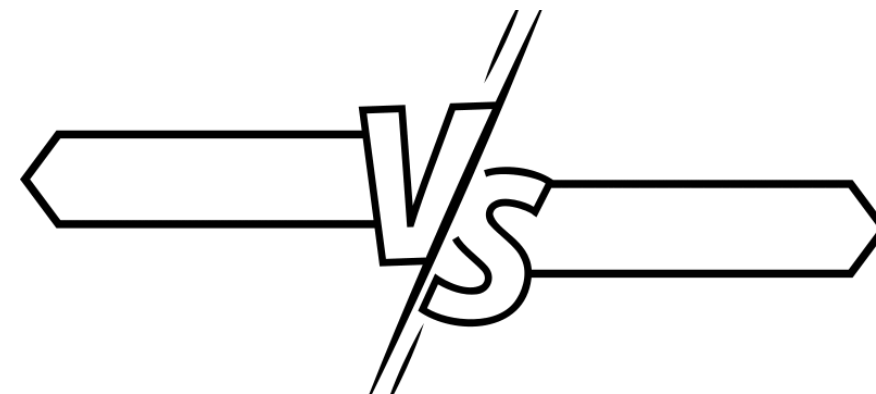
El tamaño del problema  
aumenta significativamente.

El tiempo computacional  
aumenta de Pradera  
incrementa 20 veces

Las utilidades encontradas  
están sobreestimadas



Precisión y granularidad en la toma de decisiones



Costo computacional y complejidad del problema

# ***CONCLUSIONES***



**1**

### **Aspectos del modelo a destacar:**

- Se incorporan elementos críticos del sistema (movimientos de los buses entre ubicaciones, posicionamiento estratégico, los costos operativos y la capacidad de carga de los vehículos)
- Permite una asignación de recursos que minimiza los costos operativos, maximiza la utilización de los buses y evita, en la medida de lo posible, los trayectos en vacío



**2**

### **Aspectos del modelo a mejorar:**

- Los intervalos de tiempo reducidos limitan la capacidad del modelo de capturar el comportamiento dinámico de la demanda
- Este se realizó especializado en el caso de estudio en cuestión. Lo anterior limita su capacidad de aplicabilidad en otros contextos



**3**

### **Para trabajos futuros:**

- Integración de diferentes métodos de aceleración tales como como la descomposición de Benders, métodos de corte y algoritmos metaheurísticos
- Incorporar optimización estocástica para abordar la incertidumbre en la demanda y los tiempos de viaje con el objetivo de tener una implementación y resultados más realistas

***¡Gracias por la  
atención!***

¿Preguntas?

