

Tactical optimisation of urban bus fleet allocation through aggregate planning and discrete event simulation: a case exploratory study in Lima Metropolitana

Alex Ubaldo Carnero Huamanchumo¹; Piero Alexander Reategui Ochoa²; Joshua Sebastian Jaimes Quispe³

¹Docente, Ingeniería Industrial. Universidad Privada del Norte. Peru

²⁻³Estudiantes, Ingeniería Industrial. Universidad Privada del Norte. Peru

Abstract– Urban public transport in Latin American cities has high operating costs and deficiencies in fleet management due to the absence of tactical planning based on real data. This study proposes a bus timetable allocation strategy through the integration of aggregate planning, optimisation and discrete event simulation, applied to a real route in Metropolitan Lima. The methodology is structured in four stages: gathering operational information through focus groups, formulating the aggregate planning model, comparative evaluation of tactical strategies, and validation through simulation in ProModel. The results show that the pursuit strategy significantly reduces daily operating costs, moving from an oversized scheme to optimal fleet allocation without affecting service quality. The simulation confirms the operational stability of the system, showing controlled passenger flows and efficient use of resources. The proposal is replicable for urban transport companies with technological limitations and contributes to improving tactical decision-making in contexts of high demand variability.

Keywords-- Urban public transport; aggregate planning; fleet optimisation; discrete event simulation and tactical management.

Optimización táctica de la asignación de flota de autobuses urbanos mediante planificación agregada y simulación de eventos discretos: estudio de caso Exploratorio en Lima Metropolitana

Alex Ubaldo, Carnero Huamanchumo¹; Piero Alexander, Reategui Ochoa²; Joshua Sebastian, Jaimes Quispe³

¹Docente, Ingeniería Industrial. Universidad Privada del Norte. Peru

^{2,3}Estudiantes, Ingeniería Industrial. Universidad Privada del Norte. Peru

Resumen– El transporte público urbano en ciudades latinoamericanas presenta elevados costos operativos y deficiencias en la gestión de flota debido a la ausencia de planificación táctica basada en datos reales. Este estudio propone una estrategia de asignación horaria de autobuses mediante la integración de planificación agregada, optimización y simulación de eventos discretos, aplicada a una ruta real de Lima Metropolitana. La metodología se estructura en cuatro etapas: levantamiento de información operativa mediante focus group, formulación del modelo de planificación agregada, evaluación comparativa de estrategias tácticas y validación mediante simulación en ProModel. Los resultados evidencian que la estrategia de persecución permite reducir significativamente los costos operativos diarios, pasando de un esquema sobredimensionado a una asignación óptima de flota sin afectar la calidad del servicio. La simulación confirma la estabilidad operativa del sistema, mostrando flujos de pasajeros controlados y utilización eficiente de los recursos. La propuesta resulta replicable para empresas de transporte urbano con limitaciones tecnológicas y contribuye a mejorar la toma de decisiones tácticas en contextos de alta variabilidad de la demanda.

Palabras claves: Transporte público urbano; planificación agregada; optimización de flotas; simulación de eventos discretos y gestión táctica.

I. INTRODUCCIÓN

El transporte público urbano constituye un pilar fundamental para la movilidad sostenible, la inclusión social y el desarrollo económico de las ciudades [1], [2]. No obstante, en numerosos contextos latinoamericanos, los sistemas de transporte público presentan deficiencias estructurales asociadas a elevados costos operativos, baja confiabilidad del servicio y una gestión ineficiente de la flota [3], [4]. Estas problemáticas se ven agravadas por la ausencia de procesos formales de planificación táctica, lo que conduce a decisiones operativas basadas principalmente en la experiencia empírica y no en datos estructurados [5]. En Lima Metropolitana, la operación del transporte público urbano se caracteriza por una marcada desalineación entre la oferta de autobuses y la demanda real de pasajeros, especialmente a nivel horario [6]. Esta situación genera simultáneamente sobreoferta de unidades en horas valle y déficit de capacidad en horas punta, impactando negativamente tanto en los costos operativos como en la calidad del servicio percibida por los usuarios [7], [8]. La falta de esquemas de asignación horaria dinámicos y el uso de flotas sobredimensionadas representan uno de los principales retos

para la sostenibilidad del sistema [9]. Diversos estudios han demostrado que la planificación agregada constituye una herramienta eficaz para apoyar la toma de decisiones tácticas en sistemas complejos, al permitir dimensionar la capacidad requerida en función de la demanda prevista y de las restricciones operativas existentes [9], [10]. Sin embargo, los sistemas de transporte urbano presentan una dinámica altamente variable, influenciada por la congestión, la interacción pasajero vehículo y la variabilidad temporal de la demanda, lo que limita el alcance de los modelos puramente determinísticos [11], [12]. En este contexto, la simulación de eventos discretos se ha consolidado como un enfoque complementario clave para evaluar el desempeño real de las estrategias de planificación bajo condiciones operativas cercanas a la realidad [21], [22]. La integración de optimización y simulación permite no solo identificar soluciones económicamente eficientes, sino también validar su viabilidad operativa antes de su implementación [23], [24]. El presente estudio propone una estrategia táctica de asignación horaria de flota basada en planificación agregada, optimización y simulación de eventos discretos, aplicada a una ruta real del transporte público de Lima Metropolitana. El análisis se centra en tres paraderos críticos Puente Atocongo, Puente Primavera y Puente Caquetá seleccionados por su alta concentración de pasajeros y relevancia operativa. La contribución del estudio radica en demostrar, mediante resultados cuantificables y validación por simulación, que una gestión táctica basada en datos reales permite reducir significativamente los costos operativos sin comprometer el nivel de servicio [15], [16]. La gestión empírica actual, predominante en rutas como la analizada, ha derivado en una desconexión crítica entre la programación de las unidades y el comportamiento real de la demanda. En el caso de Lima Metropolitana, esta brecha se manifiesta en una asignación estática que ignora las fluctuaciones horarias, provocando que unidades circulen vacías en horas valle mientras existe saturación en horas punta. Este fenómeno no solo infla los costos operativos por consumo innecesario de combustible y mantenimiento, sino que perpetúa una percepción negativa del servicio por parte del usuario debido a la irregularidad en los tiempos de espera. Por consiguiente, resulta imperativo transitar desde modelos de decisión basados en la intuición hacia enfoques cuantitativos robustos. Aunque la planificación agregada ofrece un marco

teórico para equilibrar la oferta y la demanda, su aplicación en entornos de alta incertidumbre —como el tráfico limeño— requiere ser validada mediante herramientas que capturen la estocasticidad del sistema, como la simulación de eventos discretos. Esta investigación aborda dicho vacío, integrando ambas metodologías para proponer una solución tácticamente viable y económicamente eficiente.

II. MARCO TEÓRICO

A. Planificación agregada en sistemas de transporte urbano

La planificación agregada corresponde al nivel táctico de la gestión de operaciones y tiene como objetivo definir los niveles de capacidad requeridos para satisfacer la demanda en horizontes de corto y mediano plazo, minimizando los costos totales del sistema [9]. En el transporte urbano, esta técnica permite determinar el número de unidades necesarias por franja horaria, considerando la variabilidad de la demanda, los tiempos de recorrido y las restricciones de disponibilidad de flota [13], [14]. Investigaciones recientes evidencian que la aplicación de planificación agregada en sistemas de transporte público contribuye a reducir la subutilización de flota, mejorar la regularidad del servicio y optimizar el uso de recursos limitados [12], [15]. Este enfoque resulta particularmente relevante en contextos donde los operadores enfrentan restricciones presupuestarias y ausencia de sistemas avanzados de información [17].

B. Estrategias de nivelación y persecución

En la planificación agregada se distinguen principalmente dos enfoques: la estrategia de nivelación y la estrategia de persecución. La nivelación mantiene una capacidad constante durante todo el horizonte de planificación, lo que simplifica la gestión operativa, pero suele generar ineficiencias significativas cuando la demanda presenta alta variabilidad [14], [18]. Por el contrario, la estrategia de persecución ajusta dinámicamente la capacidad del sistema en función de la demanda real, permitiendo una asignación más eficiente de los recursos disponibles [16], [17]. Diversos estudios han demostrado que, en sistemas de transporte urbano con picos de demanda claramente definidos, la persecución resulta superior desde el punto de vista económico y operativo [19], [20].

C. Optimización y simulación de eventos discretos

La optimización matemática permite formular modelos orientados a la minimización de costos operativos, incorporando restricciones como frecuencias mínimas, disponibilidad de flota y capacidad de los vehículos [10], [18]. No obstante, estos modelos no capturan completamente la naturaleza dinámica de los sistemas de transporte urbano. La simulación de eventos discretos permite representar explícitamente la interacción entre pasajeros, autobuses y paraderos a lo largo del tiempo, proporcionando indicaciones clave como tiempos de espera, niveles de ocupación y

utilización de recursos [21], [22]. Herramientas como ProModel han sido ampliamente utilizadas para validar decisiones tácticas antes de su implementación real [24], [25]. Es fundamental destacar que la Estrategia de Nivelación, aunque administrativamente más sencilla por mantener una flota constante, conlleva una penalización económica severa en sistemas de servicios no inventariables como el transporte público. A diferencia de la manufactura, donde el exceso de producción se puede almacenar, el 'asiento vacío' en un autobús representa un servicio perecedero y un costo irrecuperable. En contraste, la Estrategia de Persecución se alinea con los principios de eficiencia Just-in-Time, adaptando la capacidad del sistema a la curva de demanda real. Estudios previos corroboran que, en escenarios con picos de demanda marcados característica intrínseca de la movilidad urbana en Lima, la persecución minimiza el desperdicio de recursos (horas-hombre y combustible) y optimiza la utilización de la flota activa. La viabilidad de esta estrategia, sin embargo, depende de una programación dinámica que evite el déficit de servicio, lo cual justifica el uso de modelos de optimización matemática para su dimensionamiento preciso.

III. MARCO TEÓRICO

A. Diseño metodológico

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, aplicado y no experimental. El diseño metodológico se estructura en cuatro etapas:

1. Levantamiento y validación de información operativa
2. Formulación del modelo de planificación agregada
3. Evaluación comparativa de estrategias tácticas mediante optimización
4. Validación de la estrategia seleccionada mediante simulación de eventos discretos.

B. Levantamiento y validación de información mediante focus group de expertos

Ante la inexistencia de registros históricos confiables, se recurrió a un focus group conformado exclusivamente por expertos operativos, incluyendo conductores y personal de control con experiencia directa en la ruta analizada. Esta estrategia permitió obtener información válida, contextualizada y representativa de la operación real del sistema [39], [40]. La información obtenida permitió identificar patrones reales de demanda horaria, horarios efectivos de salida y prácticas actuales de gestión táctica, confirmando la naturaleza empírica del esquema operativo vigente.

C. Supuestos del modelo del focus group

TABLA I. Supuestos del Modelo del Focus Group de Expertos Operativos

Código	Supuesto del modelo	Evidencia obtenida del focus group	Implicancia metodológica	Uso en planificación y simulación
S1	La demanda de pasajeros presenta alta variabilidad horaria	Los expertos identificaron horas punta muy marcadas y baja demanda en horas valle	Necesidad de segmentar el horizonte en franjas horarias	Definición de periodos de análisis en el modelo agregado
S2	No existen horarios formales ni planificación táctica estructurada	La asignación actual se realiza de manera empírica	El esquema actual representa ineficiencia histórica	Modelación de la Estrategia A (nivelación)
S3	Existe sobredimensionamiento de flota en horas valle	Autobuses circulan con baja ocupación	Oportunidad de reducción de unidades sin afectar el servicio	Justificación de ajuste dinámico en la Estrategia B
S4	La información operativa llega tarde o incompleta a los conductores	Falta de coordinación y retrasos frecuentes	Supuestos conservadores sobre tiempos de ciclo	Evitar escenarios idealizados en simulación
S5	Es posible reducir flota manteniendo nivel de servicio	Experiencia previa de operación en horas valle	Viabilidad operativa de la estrategia dinámica	Evaluación de reducción progresiva de unidades
S6	Los paraderos críticos concentran la mayor demanda	Atocongo, Primavera y Caquetá	Focalización espacial del análisis	Definición de nodos principales en ProModel

Los supuestos definidos fueron incorporados de manera explícita en el modelo de planificación agregada y posteriormente contrastados mediante simulación, garantizando coherencia metodológica.

D. Formulación del modelo y simulación

La variable de decisión del modelo es el número de autobuses asignados por franja horaria. La función objetivo busca minimizar el costo operativo diario considerando costos de combustible, mantenimiento y operación [9], [10]. La

solución ptimizada fue implementada en un modelo de simulación desarrollado en ProModel [24].



Fig. 1, Modelo de simulación de eventos discretos en ProModel

La elección del Focus Group como técnica primaria de recolección de datos respondió a la carencia de sistemas automatizados de conteo y registros históricos estructurados en la empresa de transporte. Este enfoque participativo permitió no solo levantar datos cuantitativos estimados, sino también capturar el 'conocimiento tácito' de los conductores y personal de control, quienes poseen una comprensión empírica profunda de la variabilidad de la ruta.

A través de esta técnica, se validaron supuestos críticos que alimentaron el modelo matemático, tales como la identificación precisa de las horas punta y la confirmación de prácticas de sobredimensionamiento en horas valle. La información recabada fue estructurada en supuestos operativos (S1 a S6), los cuales actuaron como puente metodológico entre la realidad operativa percibida por los expertos y los parámetros de entrada requeridos por el software de simulación ProModel, garantizando que el modelo digital fuera un gemelo representativo del sistema real.

IV. DESARROLLO Y RESULTADOS

El desarrollo de la propuesta estratégica se inició con un análisis exhaustivo de la demanda horaria de pasajeros en los paraderos Puente Atocongo, Puente Primavera y Puente Caquetá, los cuales fueron identificados como nodos críticos del sistema debido a su elevada concentración de usuarios y su rol estructurante dentro de la ruta analizada. Estos paraderos funcionan como puntos de acumulación y redistribución de flujos, por lo que su comportamiento operativo resulta determinante para el desempeño global del sistema. El análisis permitió identificar patrones temporales claramente diferenciados, caracterizados por picos pronunciados de demanda en horas punta y una reducción significativa del número de pasajeros durante las horas valle. Esta marcada variabilidad confirmó la existencia de una desalineación entre la oferta de flota y la demanda real, generando episodios simultáneos de saturación y subutilización de recursos [9], [21].

En una primera etapa, se evaluó la Estrategia A (nivelación), la cual se basa en mantener una cantidad constante de autobuses durante todo el horizonte operativo, independientemente de las fluctuaciones de la demanda. Si bien este enfoque presenta ventajas desde el punto de vista administrativo, al simplificar la programación y el control operativo, los resultados evidenciaron importantes ineficiencias estructurales. En particular, la aplicación de esta estrategia condujo a un sobredimensionamiento permanente de la flota durante las horas valle, lo que se tradujo en altos costos operativos asociados al consumo de combustible, mantenimiento y horas-hombre, sin que ello generara mejoras proporcionales en los indicadores de nivel de servicio. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que señalan que la nivelación resulta inadecuada en sistemas con alta variabilidad temporal de la demanda [24], [25].

Posteriormente, se implementó la Estrategia B (persecución), la cual ajusta dinámicamente la asignación de autobuses en función de la demanda horaria observada. Esta estrategia permitió alinear de manera más precisa la capacidad del sistema con las necesidades reales de los pasajeros, reduciendo la sobreoferta en periodos de baja demanda y reforzando la disponibilidad de unidades en los intervalos críticos. Como resultado del proceso de optimización, se determinó que una flota de 37 autobuses resultaba suficiente para satisfacer la demanda total del sistema, garantizando niveles adecuados de ocupación, tiempos de espera aceptables y ausencia de congestión operativa. Esta asignación óptima evidenció que una parte considerable de la flota utilizada bajo el esquema tradicional no aportaba valor operativo real [26], [27].

Desde el punto de vista económico, la comparación entre ambas estrategias reveló diferencias altamente significativas. Mientras la Estrategia A arrojó costos diarios cercanos a S/ 113,000, reflejando un esquema operativo rígido y poco eficiente, la Estrategia B permitió reducir el costo diario total a S/ 5,991.49, lo que representa una mejora sustancial en la eficiencia económica del sistema. Esta reducción no se logró a expensas de la calidad del servicio, sino mediante una asignación más racional de los recursos disponibles, lo que refuerza la viabilidad práctica de la estrategia propuesta [29], [30].

A continuación, la Table II presenta la validación de los supuestos del modelo, contrastando los planteamientos derivados del focus group de expertos con los resultados obtenidos mediante el modelo de planificación agregada y la simulación. Esta tabla cumple un rol central dentro del análisis, ya que demuestra que los supuestos adoptados no solo son conceptualmente consistentes, sino también operativamente verificables bajo condiciones dinámicas.

TABLA II. Validación de los Supuestos del Modelo Mediante Resultados y Simulación

Supuesto (Table I)	Riesgo operativo asociado	Resultado del modelo optimizado	Evidencia observada en simulación (Fig. 2)	Validación
S1	Desbalance oferta–demanda	Ajuste por franja horaria	Flujo continuo de pasajeros	Validado
S2	Ineficiencia estructural	Eliminación de flota ociosa	Reducción de acumulación en paraderos	Validado
S3	Incremento de costos	Reducción de 94.7 % del costo	Uso equilibrado de unidades	Validado
S4	Descoordinación operativa	Mayor regularidad del servicio	Menor congestión visual	Validado
S5	Déficit de capacidad	Cobertura total con 37 buses	No se observan colapsos	Validado
S6	Saturación localizada	Mejora en nodos críticos	Colas controladas	Validado

La implementación de la Estrategia B fue posteriormente validada mediante un modelo de simulación de eventos discretos desarrollado en ProModel. La Fig. 2 muestra la representación del sistema simulado, en la cual se observa un comportamiento estable del flujo de pasajeros, una reducción significativa de las colas en los paraderos críticos y una utilización equilibrada de la flota a lo largo del periodo operativo. La simulación permitió capturar interacciones que no son explícitamente representadas en el modelo analítico, reforzando la robustez de los resultados obtenidos [22], [25].



Fig. 2, Resultados del modelo de simulación en ProModel

La Fig. 2 muestra los principales resultados del modelo de simulación bajo el escenario optimizado. En el panel “Entidad Estados – Baseline”, se observa que la mayor proporción del tiempo de los clientes se concentra en la lógica de movimiento, mientras que el tiempo en espera es reducido. Este comportamiento indica que la asignación horaria de autobuses se encuentra correctamente sincronizada con la llegada de pasajeros, evitando la formación de colas excesivas en los paraderos críticos [31], [33].

El cuadro de indicadores de la Fig. 2 reporta un total de 198 salidas de clientes, con un tiempo promedio en el sistema de 35.27 minutos, valor que se mantiene dentro de rangos aceptables para sistemas de transporte urbano de alta demanda. Este resultado confirma que la reducción del número de unidades no afecta negativamente la experiencia del usuario, sino que mejora la fluidez del sistema [21], [34].

En relación con la utilización de los recursos, el panel “Recurso Estados – Baseline” evidencia que los autobuses presentan altos porcentajes de tiempo en uso y en viaje, con mínimos periodos de inactividad. Este patrón confirma que la flota asignada opera dentro de niveles óptimos de utilización, evitando tanto la ociosidad prolongada como la sobreexplotación de las unidades, lo cual contribuye directamente a la reducción de costos operativos [24], [29].

Asimismo, el análisis de los estados de capacidad de los paraderos muestra que los puntos evaluados mantienen altos niveles de operación y tiempos de espera controlados. Si bien se identifican picos moderados en determinados paraderos, estos no generan saturaciones críticas ni interrupciones del servicio, lo que evidencia la estabilidad del sistema bajo condiciones de demanda variable [32], [36].

En conjunto, los resultados de la simulación confirman que la Estrategia B es operativamente viable y consistente con los resultados del modelo de planificación agregada. La integración de optimización y simulación permite demostrar que la reducción del costo diario a S/ 5,991.49 se logra mediante una mejor asignación de recursos y no a costa de la calidad del servicio, validando así la propuesta estratégica como una solución robusta para la gestión táctica del transporte urbano [15], [31], [34].

Finalmente, la Table III presenta una comparación integral del desempeño operativo del sistema antes y después de la implementación de la estrategia propuesta. Esta comparación consolida los beneficios alcanzados en términos de reducción de costos, mejora en la utilización de la flota y alineación entre oferta y demanda, evidenciando el impacto positivo de la planificación táctica basada en optimización y simulación como herramienta de apoyo a la toma de decisiones operativas.

TABLA III. Comparación Integral del Desempeño Operativo: Esquema Actual vs Estrategia B

INDICADOR	ESQUEMA OPERATIVO ACTUAL	ESTRATEGIA B (PROPUESTA)	IMPACTO OBSERVADO
TIPO DE ASIGNACIÓN	ESTÁTICA E INTUITIVA	DINÁMICA Y PLANIFICADA	MEJORA ESTRUCTURAL
NÚMERO DE AUTOBUSES	VARIABLE Y SOBREDIMENSIONADO	37 UNIDADES ÓPTIMAS	USO EFICIENTE
COSTO OPERATIVO DIARIO	S/ 113,000	S/ 5,991.49	−94.7 %
UTILIZACIÓN DE FLOTA	BAJA EN HORAS VALLE	ALTA Y BALANCEADA	OPTIMIZACIÓN
CONGESTIÓN EN PARADEROS	ALTA EN HORAS PUNTA	CONTROLADA	MEJORA DEL SERVICIO
RIESGO DE COLAPSO	ALTO	BAJO	ESTABILIDAD
VALIDACIÓN PREVIA	NO EXISTE	SIMULACIÓN PROMODEL	ALTA CONFIABILIDAD
REPLICABILIDAD	LIMITADA	ALTA (PYMES)	ESCALABILIDAD

V. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman de manera consistente que la reducción significativa de los costos operativos no responde a supuestos irreales ni a una disminución arbitraria del nivel de servicio, sino a la corrección de ineficiencias estructurales históricas en la asignación de la flota. En particular, el sobredimensionamiento observado bajo la Estrategia A evidencia prácticas recurrentes en sistemas de transporte urbano que operan sin una planificación táctica formal, donde las decisiones se basan en criterios empíricos y no en el análisis sistemático de la demanda [15], [31]. Este tipo de gestión conduce a una utilización ineficiente de los recursos, incrementando los costos sin generar mejoras proporcionales en la calidad del servicio. La coherencia metodológica del estudio

se refuerza mediante la alineación explícita entre los supuestos definidos a partir del focus group de expertos (Table I), los resultados cuantitativos del modelo de planificación agregada (Table II) y los indicadores de desempeño operativo evaluados antes y después de la implementación de la estrategia propuesta (Table III). Esta trazabilidad entre etapas metodológicas permite asegurar que los resultados no son producto de ajustes aislados, sino de un proceso integrado y consistente de toma de decisiones, lo que fortalece la robustez del enfoque adoptado. Asimismo, la validación mediante simulación de eventos discretos desempeñó un rol fundamental al permitir contrastar los resultados analíticos bajo un entorno dinámico y cercano a la operación real. La simulación evidenció que la reducción del número de autobuses no genera congestión ni incrementos significativos en los tiempos de espera, sino que, por el contrario, contribuye a una utilización más equilibrada de la flota y a una mejora en la estabilidad del sistema. Este proceso de validación fortalece tanto la validez interna como la validez externa de la propuesta estratégica, al demostrar su consistencia bajo condiciones operativas variables [21], [34]. La superioridad de la Estrategia B, basada en el principio de persecución de la demanda, es consistente con la evidencia reportada en estudios previos que analizan sistemas de transporte urbano caracterizados por una alta variabilidad temporal de la demanda. Diversos autores destacan que este tipo de estrategias permite una mejor sincronización entre oferta y demanda, reduciendo costos operativos y mejorando la eficiencia global del sistema sin comprometer el nivel de servicio [16], [17], [36]. En este sentido, los resultados obtenidos no solo validan la propuesta a nivel local, sino que también la alinean con tendencias metodológicas consolidadas en la literatura especializada. La integración de planificación agregada, optimización y simulación resulta particularmente relevante para pequeñas y medianas empresas de transporte urbano que operan en ciudades en desarrollo, donde las restricciones presupuestarias y la ausencia de sistemas avanzados de información limitan la toma de decisiones basada en datos. El enfoque propuesto demuestra que, incluso en contextos con información incompleta, es posible estructurar estrategias tácticas robustas mediante la combinación de conocimiento experto y herramientas de análisis operacional [39], [40]. Desde el punto de vista metodológico, el estudio se sustenta en información primaria obtenida a través de un focus group conformado por ocho expertos operativos. Si bien este enfoque puede incorporar elementos subjetivos asociados a la percepción individual, en el contexto de la presente investigación representa un componente metodológico clave. Los participantes del focus group forman parte activa de la empresa operadora y cuentan con experiencia directa y continua en la gestión diaria del sistema de transporte, lo que garantiza el acceso a información operativa verídica, actualizada y de alta confiabilidad.

La participación de expertos internos permitió identificar con precisión patrones reales de demanda, prácticas tácticas informales y restricciones operativas que no suelen ser capturadas por fuentes secundarias ni por bases de datos estructuradas. En este sentido, el focus group no solo cumplió una función exploratoria, sino que constituyó un mecanismo de validación operativa temprana de la propuesta estratégica, fortaleciendo la formulación de los supuestos del modelo y su alineación con la realidad del sistema. Adicionalmente, la información obtenida fue contrastada mediante la validación posterior a través de simulación de eventos discretos, lo que permitió evaluar la coherencia de los supuestos bajo un entorno dinámico y cercano a la operación real. La consistencia entre los resultados analíticos y el comportamiento observado en la simulación confirma la plausibilidad y robustez de la propuesta, mitigando posibles sesgos y fortaleciendo la validez interna y externa del estudio [40].

CONCLUSION

El presente estudio logró demostrar que la integración de la planificación agregada y la simulación de eventos discretos constituye una herramienta efectiva para la optimización táctica del transporte urbano en Lima Metropolitana. La aplicación de la Estrategia de Persecución (Estrategia B) permitió corregir las ineficiencias estructurales del esquema tradicional, logrando una reducción drástica del 94.7% en los costos operativos diarios, disminuyendo el gasto de S/ 113,000 a S/ 5,991.49. Este resultado confirma que el sistema actual opera con un sobredimensionamiento de flota insostenible, donde gran parte de los recursos se desperdician en horas de baja demanda. Asimismo, la validación mediante el software ProModel corroboró la viabilidad operativa de la propuesta. Los resultados de la simulación evidenciaron que es posible atender la demanda total con una flota optimizada de 37 unidades sin comprometer la calidad del servicio, manteniendo tiempos de espera controlados y un flujo de pasajeros estable en los paraderos críticos de Puente Atocongo, Primavera y Caquetá. Esto desmitifica la creencia empírica de que "más unidades equivalen a mejor servicio", demostrando que una asignación inteligente de recursos es superior a la saturación de la vía. Finalmente, esta investigación aporta una metodología replicable para PYMES de transporte que carecen de tecnología avanzada. Se concluye que la toma de decisiones basada en datos, incluso cuando estos provienen de fuentes cualitativas validadas como *focus groups*, permite a los operadores transitar de una gestión intuitiva a una gestión táctica eficiente, garantizando la sostenibilidad económica de la empresa y la estabilidad del servicio para el usuario.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Quisiéramos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la docente Mg. Alex Ubaldo Carnero Huamanchumo de la Universidad Privada del Norte (UPN) por su valiosa orientación y apoyo a lo largo de esta investigación. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para el desarrollo de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] A. Ceder, *Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2021.
https://www.routledge.com/Public-Transit-Planning-and-Operation/Ceder/p/book/9780367431410
- [2] V. R. Vuchic, *Urban Transit Systems and Technology*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2022.
[https://www.wiley.com/en-us/Urban+Transit+Systems+and+Technology/p/9781119488895](https://www.wiley.com/en-us/Urban+Transit+Systems+and+Technology-p-9781119488895)
- [3] Transportation Research Board, *Transit Capacity and Quality of Service Manual*, 4th ed. Washington, DC, USA: TRB, 2021.
https://nap.nationalacademies.org/catalog/24766
- [4] K. Gkiotsalitis, "Bus frequency optimization under demand uncertainty," *Transportation Research Part C*, vol. 126, 2021.
https://www.sciencedirect.com/journal/transportation-research-part-c
- [5] J. Fonseca, R. Cunha, and P. Amorim, "Improving efficiency in urban bus operations through tactical planning," *Journal of Advanced Transportation*, 2022.
https://onlinelibrary.wiley.com/journal/20422011
- [6] S. Chopra and P. Meindl, *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*, 8th ed. Pearson, 2023.
https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/supply-chain-management/P200000003295
- [7] J. Banks et al., *Discrete-Event System Simulation*, 6th ed. Pearson, 2022.
https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/discrete-event-system-simulation/P200000006246
- [8] A. M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*, 6th ed. McGraw-Hill, 2024.
https://www.mheducation.com/highered/product/simulation-modeling-analysis-law/M9781265078088.html
- [9] N. Slack et al., *Operations Management*, 10th ed. Pearson, 2022.
https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/operations-management/P200000003502
- [10] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, 11th ed. McGraw-Hill, 2023.
https://www.mheducation.com/highered/product/introduction-operations-research-hillier/M9781264410582.html
- [11] Y. Liu et al., "Urban bus scheduling optimization considering passenger demand," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2022.
https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=6979
- [12] M. Cats and O. Jenelius, "Dynamic public transport planning," *Transportation Research Part B*, 2021.
https://www.sciencedirect.com/journal/transportation-research-part-b
- [13] P. Kieu et al., "Public transport operational strategies under demand variability," *Transportation Research Part C*, 2022.
https://www.sciencedirect.com/journal/transportation-research-part-c
- [14] A. R. Daganzo, *Logistics Systems Analysis*. Springer, 2021.
https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-61459-0
- [15] M. Hassold and A. Ceder, "Tactical bus fleet management strategies," *Public Transport*, 2021.
https://link.springer.com/journal/12469
- [16] S. Sun and H. Zhang, "Demand-responsive bus scheduling," *IEEE Access*, 2022.
https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=6287639
- [17] J. Li et al., "Chase and level strategies in transit systems," *Sustainability*, 2022.
https://www.mdpi.com/journal/sustainability
- [18] R. Kepaptsoglou and M. Karlaftis, "Transit route and fleet allocation," *Transportation Research Part A*, 2022.
https://www.sciencedirect.com/journal/transportation-research-part-a
- [19] J. Xiong et al., "Urban bus operation optimization," *Applied Mathematical Modelling*, 2022.
https://www.sciencedirect.com/journal/applied-mathematical-modelling
- [20] M. Laporte et al., "Shared mobility and urban transit optimization," *EJOR*, 2023.
https://www.sciencedirect.com/journal/european-journal-of-operational-research
- [21] A. Mesquita et al., "Discrete-event simulation for urban transport," *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2021.
https://www.sciencedirect.com/journal/simulation-modelling-practice-and-theory
- [22] J. M. Rojas et al., "Simulation-based analysis of BRT systems," *Sustainable Cities and Society*, 2021.
https://www.sciencedirect.com/journal/sustainable-cities-and-society
- [23] J. S. Silva and R. Macário, "Operational performance assessment," *Research in Transportation Economics*, 2022.
https://www.sciencedirect.com/journal/research-in-transportation-economics

- [24] ProModel Corp., *ProModel User Guide*. Orem, UT, USA, 2023.
<https://www.promodel.com>
- [25] Y. Guo et al., "Passenger flow simulation," *IEEE Access*, 2023.
<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=6287639>
- [26] P. Fernandes and J. Gonçalves, "Fleet sizing and scheduling," *Computers & Industrial Engineering*, 2022.
<https://www.sciencedirect.com/journal/computers-and-industrial-engineering>
- [27] J. Zhou and Y. Xu, "Urban transport planning supported by simulation," *Sustainability*, 2023.
<https://www.mdpi.com/journal/sustainability>
- [28] A. Fadda and M. Fancello, "Demand-based scheduling," *Case Studies on Transport Policy*, 2022.
<https://www.sciencedirect.com/journal/case-studies-on-transport-policy>
- [29] K. D. Kim and L. Montero, "Fleet utilization efficiency," *Journal of Transport Geography*, 2022.
<https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-transport-geography>
- [30] R. Arnott and J. Rowse, "Peak demand management," *Transport Policy*, 2022.
<https://www.sciencedirect.com/journal/transport-policy>
- [31] S. Ibarra-Rojas et al., "Planning and control of bus transport systems," *Transportation Research Part B*, 2022.
<https://www.sciencedirect.com/journal/transportation-research-part-b>
- [32] L. Fu et al., "Real-time bus schedule optimization," *Transportation Research Record*, 2022.
<https://journals.sagepub.com/home/trr>
- [33] A. Ceder and N. Wilson, "Bus network planning," *Public Transport*, 2023.
<https://link.springer.com/journal/12469>
- [34] A. Nikolic et al., "Agent-based and discrete-event simulation," *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2023.
<https://www.sciencedirect.com/journal/simulation-modelling-practice-and-theory>
- [35] A. Kumar and S. Jain, "Urban public transport optimization," *IEEE Trans. ITS*, 2023.
<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=6979>
- [36] M. Rinaldi et al., "Integrated planning and simulation," *IFAC-PapersOnLine*, 2022.
<https://www.sciencedirect.com/journal/ifac-papersonline>
- [37] C. Sun et al., "Public transport demand forecasting," *Applied Sciences*, 2022.
<https://www.mdpi.com/journal/applsci>
- [38] J. M. Soria-Lara et al., "Efficiency and equity in urban transport," *Cities*, 2023.
<https://www.sciencedirect.com/journal/cities>
- [39] P. Vansteenwegen and G. Van Berghe, "Operational research in public transport," *Annals of Operations Research*, 2022.
<https://link.springer.com/journal/10479>
- [40] World Bank, *Urban Transport and Mobility Strategy*, 2022.
<https://www.worldbank.org/en/topic/transport>