

**PROPUESTA DE UN MODELO DE DIMENSIONAMIENTO DE FLOTA
TERRESTRE VEHICULAR PARA UNA EMPRESA DE TRANSPORTE
PÚBLICO DEL VALLE DEL CAUCA.**

**JUAN FELIPE VALENCIA RAMIREZ
CARLOS ALFREDO MARIN GUTIERREZ**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE SEDE ZARZAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
2022**

PROPUESTA DE UN MODELO DE DIMENSIONAMIENTO DE FLOTA TERRESTRE VEHICULAR PARA UNA EMPRESA DE TRANSPORTE PÚBLICO DEL VALLE DEL CAUCA.

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero(a) Industrial

**JUAN FELIPE VALENCIA RAMIREZ
CARLOS ALFREDO MARIN GUTIERREZ**

**DIRECTOR
CARLOS ALBERTO ROJAS TREJOS**

**CODIRECTOR
JULIÁN GONZÁLEZ VELASCO**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE SEDE ZARZAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

2022

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. FACTORES CRÍTICOS QUE INTERVIENEN EN EL PROBLEMA DE DIMENSIONAMIENTO DE FLOTA TERRESTRE VEHICULAR.....	8
CAPÍTULO 2. MODELO DE TOMA DE DECISIONES.....	13
CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN DEL MODELO A PARTIR DE UN CASO DE ESTUDIO EN EL VALLE DEL CAUCA	19
3.1 RESULTADOS.....	24
3.2 ANÁLISIS ESCENARIOS.....	31
3.2.1 FLOTA HOMOGÉNEA	31
3.2.2 FLOTA AUMENTADA.....	32
3.2.3 FLOTA HETEROGÉNEA.....	34

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagrama Prisma.....	11
Ilustración 2. Factores críticos.....	13
Ilustración 3:Tablero de resultados (Dashboard).....	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Factores de inclusión y exclusión	9
Tabla 2: Palabras claves.....	10
Tabla 3: Demanda (Di)	21
Tabla 4. Capacidad y Cantidad de buses	22
Tabla 5. Estructura de costos.....	22
Tabla 6. Resultados Pronósticos	28
Tabla 7. Cantidad de buses por día	29
Tabla 8. Costos totales.....	30
Tabla 9. Análisis de escenario #1.....	31
Tabla 10 Costos totales escenario #1	32
Tabla 11. Análisis de escenario #2	33
Tabla 12: Costos totales escenario #2	34
Tabla 13. Análisis de escenario #3	35
Tabla 14: Costos totales escenario #3	35

INTRODUCCIÓN

El problema de dimensionamiento de flota es uno de los problemas más comunes que suelen ocurrir en diferentes tipos de organizaciones, como en los puertos, empresas de transporte, de productos, entre otros, donde siempre trabajan con una oferta limitada y una demanda impredecible. En el sector de transporte de pasajeros, la oferta de buses siempre es limitada, y para las temporadas altas, no pueden cumplir de manera satisfactoria las necesidades de los clientes, conllevando esto a pérdidas tanto económicas como de clientes y a su vez la credibilidad de la empresa se ve afectada (Baykasoğlu et al., 2019).

Generalmente las empresas de transporte de pasajeros ya tienen unos horarios estipulados para el despacho de buses hacia algún destino, pero cuando suelen llegar las temporadas altas, estos métodos quedan obsoletos, debido a que la oferta no responde con la demanda del momento, causando que estas organizaciones tomen decisiones de último momento, sin un ningún estudio previo y como resultado la organización posiblemente podrá verse afectada en diversos factores, que en la mayoría de los casos el factor económico es el primero en verse afectado. (Liang et al., 2019).

De manera que, este proyecto busca proponer un modelo de dimensionamiento de flota terrestre vehicular para una empresa de transporte público terrestre ubicada en Roldanillo, Valle del Cauca, en donde se tomen en cuenta periodos pico de demanda, tamaño de flota y tipo de esta, con el objetivo de asegurar el uso óptimo de los recursos que conlleve minimizar los costes y establecer un tamaño adecuado de flota que permita atender la demanda de manera eficiente en los períodos pico de esta misma.

Dentro de este orden de ideas, este proyecto expone que, el problema de dimensionamiento de flota permite saber cuánto transporte, ya sea, terrestre, aéreo o marítimo es necesario para aprovisionar una empresa de la materia prima requerida, también, determina la demanda adecuada de transporte para distribuir un producto o servicio, y a su vez, establecer el tamaño óptimo de flota para el transporte de usuarios. Todos estos procesos tienen en común un objetivo general, el cual es saber cuánta flota de transporte es necesaria para cumplir con la demanda, optimizando los costos, pero satisfaciendo las necesidades del cliente (Quiroz-Silva, 2019).

De la misma forma, el dimensionamiento de flota es un problema que se da a nivel global. Esta dificultad en ciertos escenarios se caracteriza por ser un problema con un nivel de dificultad elevado, dado a las cantidades de variables y parámetros que se deberían ser analizados para llegar a una solución óptima. Por lo general, esta situación se frecuenta en los sistemas de transporte público urbano, en donde el tamaño de flota de los buses suele ser deficiente respecto a la demanda de usuarios. Este problema no simplemente se da en estos sistemas de transporte público, sino también en el transporte de carga pesada, debido a que, si no se da una buena logística en estos procesos, se incurrirán en retrasos para la entrega de mercancías, o de servicios. Cabe mencionar que el dimensionamiento de flota es una situación que comúnmente se presenta en las empresas, acarreando esto a elevados costos de transporte, pérdida de proveedores y de la misma manera de clientes (Liang et al., 2019).

Según (Liang et al., 2019), en un entorno de tráfico estocástico, las desviaciones de los autobuses en circulación respecto a los horarios son inevitables. Con base en lo anterior, en las empresas de transporte público en muchas ocasiones pasa que la demanda de usuarios no pueda ser solventada en el tiempo estipulado, generando tiempos de espera extensos, y, el uso inadecuado de la capacidad de los autobuses, para este último, incurre en los periodos picos de demanda, es decir, cuando la demanda de usuarios es elevada, la capacidad de los autobuses se usará por completo, pero la oferta de estos mismos no es suficiente para abastecer la demanda, originando una pérdida potencial de clientes y a su vez, de ingresos. Caso contrario pasa con la baja demanda de usuarios, pues la capacidad de los autobuses no es usada de manera efectiva, por lo tanto, ocasiona que algunos estén llenos y otros casi vacíos, influyendo en un aumento de costes por uso de autobuses, ya que para estos periodos un tamaño de flota alto puede no ser requerido. Siendo este uno de los problemas más frecuentes para este tipo de organizaciones y que más prioridad tiene dentro de estas (Liang et al., 2019).

Con relación a la problemática expuesta anteriormente, surge la siguiente pregunta de investigación.

¿Cómo minimizar el costo total operacional de una empresa de transporte terrestre por medio del dimensionamiento de flota de vehículos disponibles?

Con base en lo anterior, se realizó una serie de investigaciones donde se relacionan con la problemática acontecida en la empresa caso de estudio.

Para iniciar, Carlos Fabian Flórez Valero & Pedro Luís Jiménez Póveda, (2007) determinan unos aspectos que puedan dar un ajuste al diseño operacional de una flota de transporte público colectivo, teniendo como propósito aumentar la productividad en la empresa ALIANZA SAT S.A en Bogotá DC. De tal manera, para este trabajo se decidió emplear los siguientes métodos: recopilación de la información, implementación de un diseño operacional estándar, evaluación de resultados, ajustes de la operación, realización de correlaciones en función de la demanda de pasajeros y por último las conclusiones y la recomendación. En resumen, se obtuvo como resultado del proceso una mejora en la rentabilidad de la empresa, aplicando los pasos anteriormente mencionados, aunque cabe resaltar que algunos parámetros tienden a mejorar hasta cierto punto, pero luego esta tendencia pasa a bajar, limitando así la aplicación de los factores objeto de estudio. Para culminar, el autor recomienda para futuros trabajos, analizar todos estos parámetros en las empresas competentes, puesto que estas no poseen estudios iguales o similares al realizado con la empresa ALIANZA SAT S.A.

Por otra parte (Jara-Díaz et al., 2017) abordan el análisis sobre el problema de hallar el tamaño óptimo de la flota de vehículos (autobuses), así como la capacidad de estos, considerando factores como la demanda, el flujo de usuarios y la duración de los viajes, además de tener en cuenta que estos factores difieren durante periodos pico y no pico. Con base en esto, el autor empleó un modelo que considera una sola línea y un solo periodo de tiempo, que luego, fue ampliado a un modelo que contemple ambos periodos de manera simultánea (multi periodo), resaltando entre todos los resultados arrojados por el modelo que en los periodos pico y no pico, la frecuencia óptima en el periodo pico es mayor y el tamaño de los autobuses menor que lo que se obtiene cuando se optimiza el periodo pico de forma individual. Además, el modelo utilizado puede ser aplicado para

explorar otras cuestiones importantes, como, por ejemplo, un análisis de costos que permita examinar las pérdidas debidas a un diseño basado en un modelo de un solo periodo con ajustes para operar en otro periodo.

Así pues, el dimensionamiento de flota en el transporte público se vuelve una herramienta fundamental para solucionar las situaciones anteriormente mencionadas, brindando así una agradable satisfacción para los clientes y unos mejores resultados económicos y de distinción a nivel organizacional. (Alkheder et al., 2019)

Para poder dar solución a este problema, es necesario empezar a analizar factores que comúnmente no se tienen en cuenta, puesto que como lo da a conocer el ministerio de transporte, en el año 2019 se presentó una demanda de 136.183.088 usuarios aproximadamente y para el año 2017 la cifra fue de alrededor de 125.453.270 clientes, mostrando una variación del 8,55%, dando a conocer un crecimiento que se ha venido dando en estos últimos años (Peñaloza et al., 2019). Aun así, conociendo que esto es algo inequívoco, las empresas de transporte público terrestre no hacen un análisis profundo de eventos disruptivos que puedan distorsionar el normal desempeño, por ejemplo, algunas causas externas como lo puede ser un desastre natural o una emergencia sanitaria, aunque del mismo modo, se pueden presentar falencias internas, como lo es el mal funcionamiento de los vehículos o también la ausencia de conductores (Carlos Fabian Flórez Valero & Pedro Luís Jiménez Póveda, 2007). Sin embargo, el transporte no deja de ser una necesidad para la sociedad, por lo tanto, esto trae nuevos retos e incógnitas que resolver, para lograr brindar un servicio de calidad, sin contratiempos y con la mayor puntualidad posible. (Jara-Díaz et al., 2017)

Por consiguiente, este proyecto tiene como finalidad proponer un modelo de dimensionamiento de flota terrestre vehicular, con el fin de contribuir a un tamaño óptimo de la flota, capaz de reaccionar en las temporadas altas, trayendo así, mayor rentabilidad, mejor calidad de servicio para la organización y minimizar el costo total del trayecto, tomando como caso de estudio una empresa de transportadores ubicada en el departamento del Valle del Cauca. De manera que, se define como objetivo general:

- Proponer un modelo de dimensionamiento de flota terrestre vehicular para una empresa de transporte público del Valle del Cauca que contribuya a minimizar el costo total de la operación.

De igual manera, para poder alcanzar este objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Determinar los factores críticos que intervienen en el problema de dimensionamiento de flota terrestre vehicular.
- Formular un modelo de toma de decisiones que considere los factores críticos analizados.
- Validar el modelo a partir de un caso de estudio en el Valle del Cauca

Ahora bien, para poder alcanzar estos objetivos planteados, se afronta la problemática en tres etapas. En primer lugar, para cumplir con el primer objetivo, se debe hacer una revisión sistemática de la literatura con la finalidad de identificar factores críticos asociados al problema de dimensionamiento de flota terrestre vehicular. La revisión en

cuestión será realizada por medio de bases de datos bibliográficas, tales como, Web of Science, Scopus, Springer, Virtual Pro, entre otros. Asimismo, haciendo uso de repositorios institucionales, como las bibliotecas digitales de las universidades. También, se propone realizar una evaluación a través de repositorios gubernamentales y no gubernamentales de los elementos esenciales para la toma de decisiones asociados con la determinación del dimensionamiento de vehículos y sus repercusiones en términos de cubrimiento de demanda de pasajeros. Después de esto, se define un modelo verbal, se establecen los supuestos del modelo, se define los conjuntos principales e inducidos, los parámetros, las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones del modelo. Finalmente, para el cumplimiento del último objetivo específico, se definirá un caso de estudio enmarcado en el Valle del Cauca, donde a través de tablas de recolección de datos se definirá la información cuantitativa asociada a los parámetros del modelo. Posteriormente se realizará un análisis de resultados del modelo y un estudio de escenarios a partir de la variación de parámetros de interés y su impacto en la función de desempeño.

Finalmente, con base a lo suministrado anteriormente, en el presente proyecto se hace un análisis del objeto de estudio, en una empresa caso de estudio, ubicada en el municipio de Roldanillo Valle del Cauca. Para esto, es importante exponer información relevante sobre la situación del dimensionamiento de flota terrestre vehicular en las empresas de transporte.

CAPÍTULO 1. FACTORES CRÍTICOS QUE INTERVIENEN EN EL PROBLEMA DE DIMENSIONAMIENTO DE FLOTA TERRESTRE VEHICULAR.

Para abordar el problema de dimensionamiento de flota vehicular, es de suma importancia conocer los trabajos e investigaciones realizadas por diversos autores. En este orden de ideas, este capítulo presenta una revisión sistemática de la literatura con el fin de dar a conocer cuáles son los factores críticos que intervienen en el problema de dimensionamiento de flota terrestre vehicular, con la finalidad de identificar las características que subyacen en este problema.

De esta manera, para la obtención de los artículos, se realizaron una serie de pasos explicados a continuación (Óscar A Beltrán, 2005). En primer lugar, se definieron los objetivos y/o preguntas de investigación, las cuales son, ¿Cuál es el propósito o finalidad de la investigación?, ¿cuáles son los enfoques de la aplicación?, ¿cuál es la metodología planteada para el desarrollo de la solución del problema de dimensionamiento de flota terrestre vehicular?, ¿cuál es el enfoque de solución empleado?, ¿cuál es el propósito o finalidad de la investigación? y, por último, ¿Recomendaciones o futuras investigaciones?

A partir de esto, se definieron unos criterios de inclusión y exclusión, para la selección de los artículos, los cuales se muestran a continuación.

Tabla 1: Factores de inclusión y exclusión

Criterio	Inclusión	Exclusión
Diseño del estudio	Artículos de revisión o de investigación de libre acceso cuyos temas abordados sean, estrategias, modelos, desarrollo de soluciones para problemas de dimensionamiento de flota terrestre vehicular.	Documentos de sesiones de conferencia o conferencias documentadas y capítulos de libros, información no indexada, documentos de opinión o información periodística
Resultado	Revisión sistemática de artículos de investigación o revisión cuyo planteamiento sea la solución de problema dimensionamiento de flota terrestre vehicular en el transporte público	Investigaciones cuyos temas abordados sean la dimensión de flota en trenes, vehículos automatizados, vehículos eléctricos, taxis, barcos y aviones.
Intervenciones	Revisión sistemática de artículos de investigación cuyos casos hayan sido aplicados a empresas de transporte terrestre vehicular, sea pública o privada.	Investigaciones que hayan estudiado el problema, pero no se evidencie una metodología de toma de decisión.

Fuente. Elaboración propia

Después de definir los criterios de inclusión y exclusión, se eligieron las bases de datos para la búsqueda de los artículos, las cuales se tomaron Web of Science y Scopus, ya que estas hacen parte de las colecciones en línea de investigación científica más importantes del mundo.

Seguidamente, se realizó una determinación de los términos que se iban a tener en cuenta al momento de hacer la búsqueda en las bases de datos mencionadas anteriormente. De este modo, a continuación, se muestran los términos o palabras claves y los tópicos seleccionados.

Tabla 2: Palabras claves

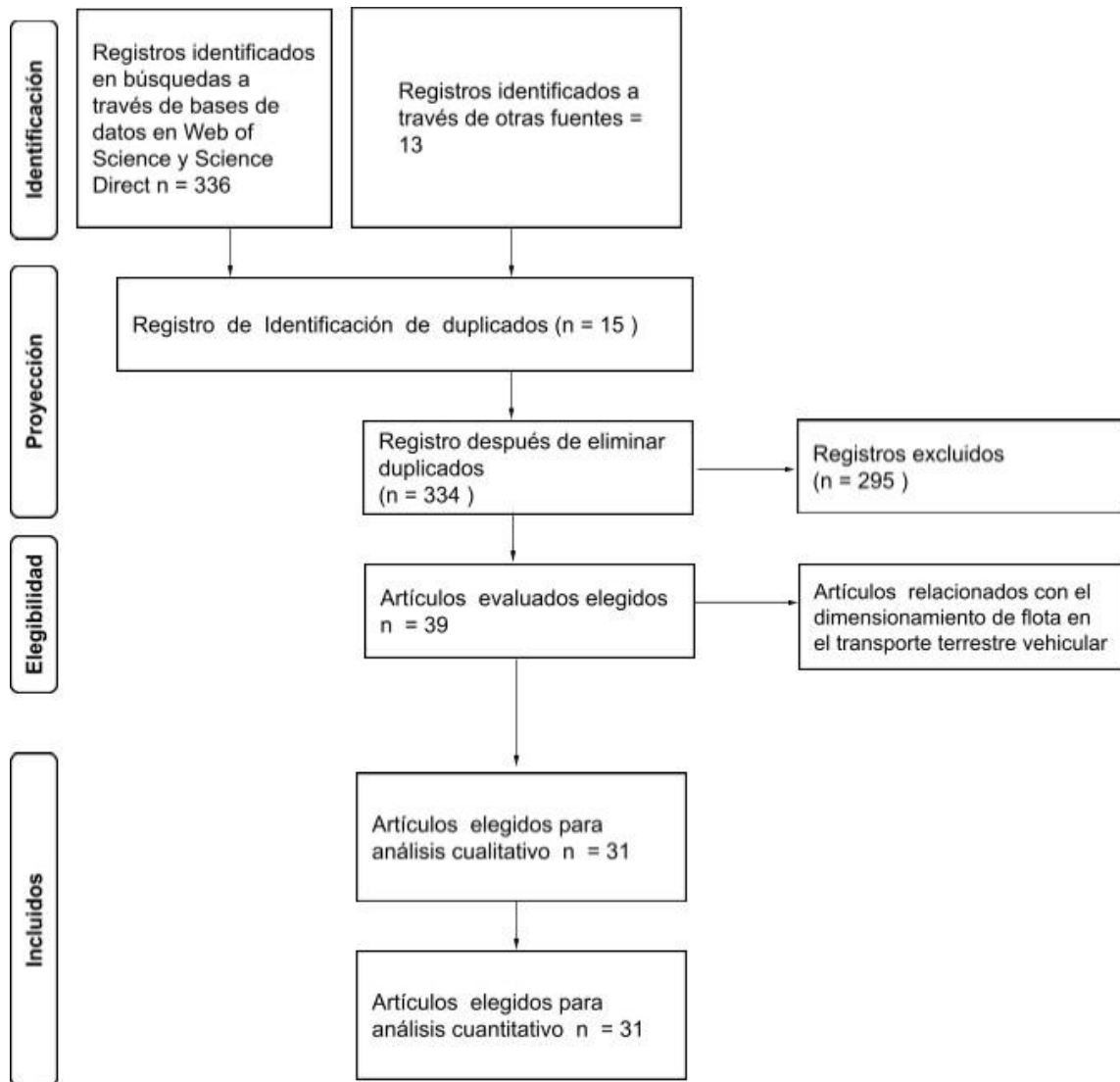
TÓPICO	TÉRMINOS O PALABRAS CLAVES
Dimensionamiento de Flota	"fleet sizing" OR "fleet size" OR "fleet composition" OR "fleet deployment" OR "fleet size optimization" OR "fleet size determination" OR "fleet sizing in public transport" OR "passenger transportation fleet sizing" OR "bus fleet size problem" OR "bus fleet size" OR "vehicle capacity" OR "fleet size problem" OR "fleet sizing problem" OR "FS problem" OR "fleet size with time windows" "bus fleet size with time windows"
NOT	
Tipo de transporte	"automatized vehicle" OR "taxi transport" OR "autonomous"
AND	
Tipo de servicio	"public transport" OR "private transport" OR "bus transport"
AND	
Tipo de artículo	"research article" OR "review article"
AND	
Horizonte de tiempo	2000-2022

Fuente. Elaboración propia

En este sentido, se identificaron 31 artículos de revisión e investigación, donde cumplen con los parámetros mencionados anteriormente, los cuales fueron extraídos de las bases adscritas a la universidad del Valle, Scopus (Clavirate) y Web of Science (Elsevier).

Para hacer el filtro en las bases de datos, se llevó a cabo una evaluación de calidad, con el objetivo de tomar los artículos que tuvieran un mayor enfoque sobre el tema a tratar. Por consiguiente, se hizo apoyo de un diagrama prisma, el cual muestra la cantidad de artículos obtenidos en la primera búsqueda y cuales fueron cada uno de los pasos ejecutados para obtener la cantidad de artículos que cumplían con los criterios de aceptación y cuáles no.

Ilustración 1. Diagrama Prisma



Fuente. Elaboración propia

Con el fin de llevar a cabo una descomposición de esta propuesta, fue importante ser muy objetivos en los criterios de selección, con la finalidad de agilizar el proceso de búsqueda en las bases de datos. De igual manera, fue de relevancia tener un sesgo de tiempo en las publicaciones las cuales van desde el 2000 hasta el 2022, a fin de conocer las soluciones modernas sobre el problema de dimensionamiento de flota terrestre vehicular.

Dentro de este orden de ideas, para la elección de los artículos se realizó una serie de pasos contenidas en cuatro etapas, las cuales son: Identificación, proyección, elegibilidad y la inclusión de los artículos. En la primera etapa se obtuvo una identificación

de 336 artículos, extraídos de las bases de datos de Web of Science y Scopus y adicional, se incluyeron 13 artículos los cuales fueron identificados en otros tipos de fuentes.

En la segunda etapa, se hizo un análisis de los artículos duplicados, descartando así 15 de estos, teniendo como nuevo saldo 334 artículos. De estos, se excluyeron 295 artículos, los cuales abordaban el tema de dimensionamiento de flota, pero dirigidas a otras áreas, como trenes, transporte de pasajeros en vehículos pequeños (taxis), transporte marítimo, transporte autónomo, entre otros. Por otra parte, se incluyeron 31 artículos, dado que cumplían con los requerimientos anteriormente mencionados.

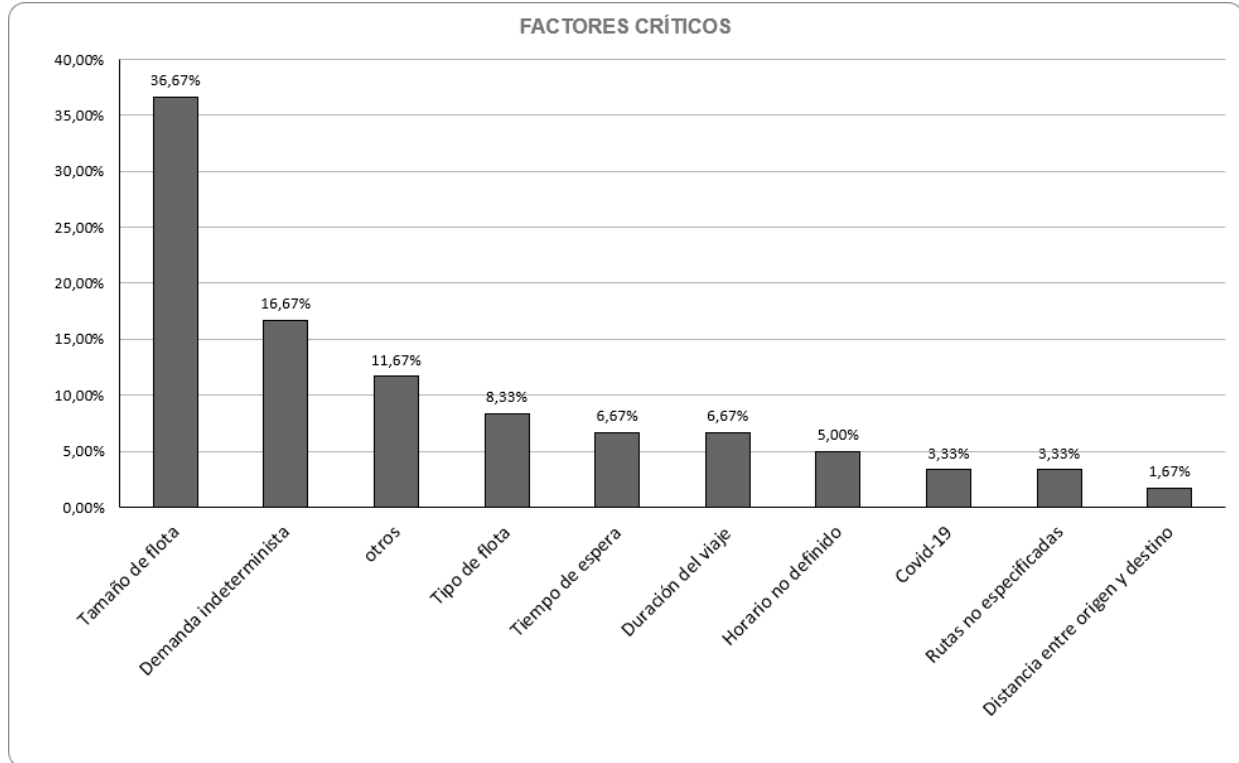
Recapitulando, a continuación, se presenta en la tabla los factores críticos asociados al problema de dimensionamiento de flota terrestre vehicular aportados por cada uno de los autores en sus diferentes investigaciones (VER ANEXO 1 y 2).

Finalmente, se pudo evidenciar que el factor crítico de tamaño de flota, con un 36,67% de participación, es el mayor inconveniente para tener un apropiado dimensionamiento de flota terrestre vehicular (Chakroborty et al., 2001), (Vis et al., 2005), (Ceder, 2005), (Diana et al., 2006), (Carlos Fabian Flórez Valero & Pedro Luís Jiménez Póveda, 2007), (Zografos et al., 2008), (S. Liu et al., 2009), (Hoff et al., 2010), (Loxton et al., 2012), (Rahimi-Vahed et al., 2015), (Costa Salas & Castaño Perez, 2015), (Brandão, 2009), (Jain et al., 2017), (Alonso-González et al., 2018), (Alkheder et al., 2019), (Liang et al., 2019), (Baykasoğlu et al., 2019), (Eshragh et al., 2020), (Toro-González et al., 2020), (Papanikolaou & Basbas, 2021), (Narayan et al., 2021), (H. Liu et al., 2022).

Seguido de esto, el segundo factor crítico, con un 16,67% de participación, es tener una demanda indeterminista (Chakroborty et al., 2001), (Diana et al., 2006), (Carlos Fabian Flórez Valero & Pedro Luís Jiménez Póveda, 2007), (Zografos et al., 2008), (Jain et al., 2017), (Jara-Díaz et al., 2017), (Alonso-González et al., 2018), (Alkheder et al., 2019), (Baykasoğlu et al., 2019), (Papanikolaou & Basbas, 2021).

Como tercer factor crítico más citado, se encuentra el tipo de flota, teniendo una participación del 8,33% (Hoff et al., 2010), (Loxton et al., 2012), (Toro-González et al., 2020), (Papanikolaou & Basbas, 2021) (H. Liu et al., 2022). Continuando, se encuentran las problemáticas de duración de viaje (Diana et al., 2006), (Rahimi-Vahed et al., 2015), (Jara-Díaz et al., 2017), (Baykasoğlu et al., 2019) y tiempo de espera (Diana et al., 2006), (Shang et al., 2019), (Liang et al., 2019), (Papanikolaou & Basbas, 2021) con una participación del 6,67% cada uno. Seguidamente, con una participación del 5%, se encuentra el factor crítico de horario no definido (Ibarra-Rojas et al., 2014) (Jara-Díaz et al., 2017), (Coutinho et al., 2020). Otros factores que se suman a esta problemática son los de COVID-19 (Wernecke Fumagalli et al., 2021), (Gkiotsalitis & Cats, 2021) y distancias entre el origen y el destino (Hoff et al., 2010). Finalmente, se encuentran otros factores con una menor participación, entre estos, costes operativos (Chakroborty et al., 2001), velocidad de viaje (Vis et al., 2005), programación de vehículos (Ibarra-Rojas et al., 2014), terminales de transporte (Peñaloza et al., 2019), entre otros, teniendo como participación general del 11,67%.

Ilustración 2. Factores críticos



Fuente. Elaboración propia

Dadas las características de la problemática, se seleccionaron 4 factores críticos, los cuales son: Tamaño de flota, Demanda determinista, tipo de flota y duración de viaje. Se excluyeron los factores de tiempo de espera, dado que no es un aspecto importante para considerar en el caso, y de la misma manera se excluye el factor de COVID-19, dado que es un factor disruptivo, por el cual no es algo permanente y con la medida del tiempo, estas restricciones tenderán a desaparecer.

CAPÍTULO 2. MODELO DE TOMA DE DECISIONES

El presente capítulo consta de dos instancias, en la primera, teniendo en cuenta las características específicas del problema, también de la empresa caso de estudio, y bajo las particularidades encontradas en las investigaciones de los diferentes artículos, se formula un modelo matemático de dimensionamiento de flota terrestre vehicular para una empresa de transporte público del Valle del Cauca que considere los factores críticos que fueron analizados con la finalidad de dar respuesta al planteamiento desarrollado en el objetivo general, ya que se logra evidenciar el gran nivel de efectividad que poseen estos modelos, dado su nivel de satisfacción basados en sus resultados. (Narro, 1996)

En segunda instancia, se realizará un análisis de pronósticos de la demanda por medio de la evaluación de tres métodos de pronósticos: Promedio Móvil, Suavización Exponencial Simple y Suavización Exponencial Doble, cuyo objetivo es calcular el valor proyectado de la demanda para el periodo siguiente, dado los resultados, teniendo en cuenta los valores del ECM (Error Cuadrático Medio) de cada método, será elegido el método de pronóstico cuyo valor de ECM sea el menor. Teniendo en cuenta el valor seleccionado, este será integrado en conjunto con el modelo matemático con la finalidad de realizar una proyección tanto de la flota vehicular como de los costos totales de operación para el periodo pronosticado.

MODELO MATEMÁTICO

Para este, se utilizó como referencia modelos de programación entera lineal propuesta por autores como: (Alkheder et al., 2019), (Vis et al., 2005), (Ceder, 2005), (Hoff et al., 2010), (Rahimi-Vahed et al., 2015), (Brandão, 2009), (Eshragh et al., 2020), (Toro-González et al., 2020), cuyos trabajos tenían como objetivo minimizar los costos totales y, optimizar el tamaño de flota vehicular terrestre de manera que se pudiese cumplir con la demanda diaria de pasajeros.

Siendo así, el modelo a desarrollar consiste en determinar el tamaño de flota y consecuentemente minimizar los costos totales, teniendo en cuenta parámetros como la demanda diaria de pasajeros, tipo, capacidad y número de autobuses, coste por kilómetro del autobús, tiempo de ciclo de la ruta y distancia a recorrer.

Ahora bien, para comenzar el desarrollo de este modelo se deben tener en cuenta una serie de supuestos, los cuales son:

1. El tiempo de ciclo estará expresado en minutos.
2. Las horas de trabajo para todos los vehículos será de 8 horas.
3. Se conoce la distribución de la demanda.

DEFINICIÓN DEL MODELO:

Para efectos de hacer un seguimiento de los resultados del modelo y para facilitar la programación, se decidió manejar tres tipos de conjuntos: rutas, tipos de buses, y capacidades de buses.

Definición de los conjuntos:

i = Conjunto de rutas.

j = Conjunto de tipo de buses.

k = Conjunto de capacidades de buses.

Parámetros:

r = Cantidad de rutas.

b = Cantidad de tipo de buses.

c = Cantidad de capacidades de buses.

CB_{ijk} = Costo para que un bus de tipo j y capacidad k complete un ciclo en la ruta i .

CTB_{ijk} = Costo total diario de un bus de tipo j y capacidad k en la ruta i .

CT = Costo total por día.

d_i = Demanda diaria en la ruta i .

BD_{jk} = Cantidad de buses disponibles de tipo j y capacidad k .

AD_{jk} = Cantidad de asientos disponibles de un bus de tipo j y capacidad k .

TC_{ijk} = Tiempo que tarda un bus de tipo j y capacidad k en realizar un ciclo en la ruta i .

TH_{ijk} = Cantidad total de horas de operación de un bus de tipo j y capacidad k en un determinado día en la ruta i .

TTC_{ijk} = Cantidad total de ciclos que un bus de tipo j y capacidad k realiza en un determinado día en la ruta i .

Variables de decisión:

B_{IJK} = Cantidad de buses de tipo j y tamaño k en la ruta i en un determinado día.

Función Objetivo:

$$Z_{min} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c B_{ijk} * CTB_{ijk} \quad (1)$$

En donde:

$$CTB_{ijk} = CB_{ijk} * TTC_{ijk}$$

$$TTC_{ijk} = \frac{TH_{ijk}}{TC_{ijk}}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^r B_{ijk} \leq BD_{jk}, \quad \forall j, k \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c M_{AD_{jk}} * TTC_{ijk} * B_{ijk} \geq d_i, \quad \forall i \quad (3)$$

$$B_{ijk} \geq 0, \quad \forall i, j, k \quad (4)$$

Partiendo de la función objetivo expresada en la ecuación (1). Esta contempla la cantidad de autobuses en conjunto con el tamaño de estos que serán utilizados en cada una de las rutas, además del número total de ciclos que un autobús realiza en su respectiva ruta, para así, tener como resultado minimizar el costo total(diario), así como satisfacer la demanda diaria sin exceder el tamaño de flota.

Por consiguiente, la ecuación (2) considera que el número de autobuses asignados en cada ruta no debe exceder el número total de vehículos disponibles. La ecuación (3) garantiza que la capacidad de todos los vehículos, es decir, la cantidad de puestos debe ser mayor o igual a la demanda de pasajeros diaria en cada una de las rutas. Por último, la ecuación (4) asegura la no negatividad en la variable de decisión.

ANÁLISIS DE PRONÓSTICOS DE LA DEMANDA

Primero, se debe disponer de datos históricos de la demanda suficientes, luego seleccionar el periodo a pronosticar, horizonte de planeación y, por último, el intervalo del pronóstico (Vidal Holguín, 2017). Después, para realizar el análisis de la demanda se escogió evaluar tres métodos de pronósticos:

- Promedio Móvil
- Suavización Exponencial Simple
- Suavización Exponencial Doble

Luego de realizar cada uno de los tres pronósticos se compararán los resultados y se escogerá como mejor resultado aquel pronóstico cuyo ECM (Error Cuadrático Medio) haya sido el de menor valor.

Promedio Móvil:

Este método es uno de los más sencillos, pero no menos útil. Además, el promedio móvil es el ideal para demandas cuyo comportamiento sea, estable, perpetua y con poca o nula tendencia. (Vidal Holguín, 2017).

El promedio móvil se obtiene a través del cálculo del promedio de los últimos N valores por medio de la estadística, expresándose en la siguiente fórmula (Vidal Holguín, 2017):

$$M_T = \frac{X_T + X_{T-1} + X_{T-2} + \dots + X_{T-N+1}}{N} \quad (5)$$

También expresada como:

$$M_T = M_{T-1} \frac{X_T - X_{T-N}}{N} \quad (6)$$

Donde T es el periodo actual con el cual se calcula el promedio, retrocediendo N periodos, es decir $T - N + 1$. Por lo tanto, el valor de M_T es el promedio que se usa para pronosticar la demanda del periodo siguiente o los periodos que se deseen pronosticar. (Vidal Holguín, 2017)

Suavización Exponencial Simple:

Establece un inventario de seguridad que pueda adaptarse a la aleatoriedad dadas por el término e_t . (Vidal Holguín, 2017) La ecuación de la suavización exponencial simple está definida como:

$$S_T = \alpha x_T + (1 - \alpha)S_{T-1} \quad (7)$$

Donde:

T = Periodo

S_T = Primer estimador en T

S_{T-1} = Pronóstico anterior, es decir, la estimación del parámetro b realizada al final del período $T-1$.

x_T = Demanda real observada al final del período actual T .

α = Constante de suavización (inicialmente definida en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$).

Suavización Exponencial Doble:

La suavización exponencial doble considera la posible tendencia de la demanda. Existe una ecuación que rige este método de pronósticos, vista anteriormente en la suavización exponencial simple, expresada como (Vidal Holguín, 2017):

$$S_T = \alpha x_T + (1 - \alpha)S_{T-1} \quad (8)$$

Ahora bien, se introduce la siguiente ecuación, que es razón por la que se caracteriza como suavización “doble”, caracterizándose de la siguiente manera (Vidal Holguín, 2017):

$$S_T^{[2]} = \alpha S_T + (1 - \alpha)S_{T-1}^{[2]} \quad (10)$$

Donde:

$S_T^{[2]}$ = Segundo estimador en T

Para calcular el pronóstico de la demanda en τ periodos adelante, teniendo como base los valores de S_T y $S_T^{[2]}$ en el periodo actual T , se usa la siguiente ecuación:

$$x_{T+\tau} = d2 + \frac{\alpha\tau}{1 - \alpha} f S_T - d1 + \frac{\alpha\tau}{1 - \alpha} f S_T^{[2]} \quad (11)$$

Sin embargo, esta cuenta con unas series de pasos adicionales, en este caso, se requiere la inicialización de la suavización exponencial doble para poder estimar los valores iniciales de S_0 y $S_0^{[2]}$. Por lo tanto, la inicialización estaría representada así (Vidal Holguín, 2017):

$$S_0 = b_1(0) - \frac{(1-\alpha)}{\alpha} b_2(0) \quad (12)$$

$$S_0^{[2]} = b_1(0) - 2h \frac{(1-\alpha)}{\alpha} b_2(0) \quad (13)$$

Se debe tener en cuenta que:

$b_1(0)$ = Estimación del valor constante alcanzado por la demanda (corte con el eje y), determinado con base en la regresión lineal de datos históricos.

$b_2(0)$ = Estimación de la pendiente de la tendencia de la demanda (creciente o decreciente) determinada con base en los datos históricos.

También se debe tener en cuenta la siguiente ecuación, para estimar el valor de inicialización $b_1(0)$ (Vidal, 2017):

$$b_1(0) = a_1(0) - m b_2(0) \quad (14)$$

Donde:

m = Número de periodos utilizados con base en los datos históricos para estimar $a_1(0)$ y $b_2(0)$.

$a_1(0)$ = Primera estimación de corte con el eje y

$b_2(0)$ = Pendiente

Por último, el **ECM**, será el valor clave para decidir qué pronóstico fue el de mejor resultados. Según (Vidal Holguín, 2017) el **EMC** se define como "Promedio de los errores

cuadráticos sobre un número de períodos definido por el usuario" y se expresa de la siguiente manera:

$$ECM = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \hat{x}_t)^2}{n} \quad (15)$$

CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN DEL MODELO A PARTIR DE UN CASO DE ESTUDIO EN EL VALLE DEL CAUCA

En este capítulo, se llevará a cabo una breve descripción de la empresa caso de estudio, como también, la ejecución y validación del modelo propuesto en el capítulo 2, el cual se basa en la actividad que comúnmente realiza la empresa caso de estudio, acondicionando este a las variables y parámetros con las cuales cuenta esta.

Para iniciar, la empresa caso de estudio nace en el municipio de Roldanillo Valle, el 16 de noviembre de 1942, bajo dos razones fundamentales, las cuales son convertir el transporte en una actividad económica para la supervivencia de los transportadores, y también, crear una sociedad de conductores con un mismo fin, prestar un servicio a la comunidad.

Sus primeras operaciones las realizó hacia los municipios más cercanos, entre estos a Bolívar, Zarzal, El Dovio y la Unión.

Después, en el año de 1960 se crea la ruta Roldanillo Cali, prestando este servicio en vehículos tipo taxi, con capacidad máxima de 5 pasajeros. Ya para el año de 1975 el INTRA (Instituto especializado en transporte y seguridad vial Intra-Grupo-vial) oficializó la ruta Roldanillo-Cali. De esta manera, la empresa tomó la decisión de definir la cantidad de vehículos que harían parte del recorrido diariamente.

Seguidamente, para el año de 1988 inicia la transformación de la cooperativa, de una empresa de transporte regional a una de operación nacional, pasando de automóviles de cinco pasajeros a vehículos tipo microbús de once pasajeros. A partir del año 1991, llegaron a la empresa vehículos tipo microbús de doble llanta trasera, con capacidad de 16 pasajeros, teniendo así un ingreso de asociados y adicional, el aval del gobierno para abrir nuevas rutas. Entre los años 1999 y 2001 se obtuvo la habilitación para poder seguir operando como una empresa de transporte público terrestre automotor en la modalidad de pasajeros. Cabe anotar que esta habilitación viene a reemplazar la llamada Licencia de Funcionamiento.

Al momento, la empresa se posiciona como una de las más importantes y competentes tanto a nivel regional como a nivel departamental. Hoy en día esta cuenta con una gran variedad de rutas, como son, Roldanillo Cali y viceversa, Roldanillo Pereira y viceversa, Cartago-Cali y viceversa, Roldanillo-Armenia y viceversa, Tuluá-Pereira y viceversa, Roldanillo Naranjal y viceversa, entre otras. Además, cuenta con una importante flota de vehículos, conformada por 151 microbuses, de los cuales solo 1 pertenece a la empresa caso de estudio, el resto de estos a los asociados. También, se cuenta con 28 camperos y 13 busetas. Por último, la empresa caso de estudio últimamente le ha estado apostando a un nuevo servicio, en este caso a los envíos de encomiendas, objetos, entre otros. Información suministrada por la empresa caso de estudio.

A continuación, se realizará la validación del modelo propuesto en el capítulo anterior, donde por medio de un análisis de demanda de pasajeros, se hizo elección

de la ruta Roldanillo-Cali, la cual es la que presenta uno de los mayores flujos de pasajeros en los últimos años. Cabe resaltar que la empresa, caso de estudio y más la ruta elegida, han tenido un crecimiento importante de pasajeros en los últimos periodos. De acuerdo con los parámetros planteados para el desarrollo del modelo, se estimó la información a ingresar:

Demanda (d_t)

Con base en la información suministrada por la empresa caso de estudio, se puede visualizar la cantidad de pasajeros registrados para el mes de diciembre desde el año 2015 hasta el año 2019 (Ver Tabla 3). No se tuvieron en cuenta los últimos dos años debido a eventos disruptivos que afectaron el normal funcionamiento de la empresa. Cabe resaltar que se tomó solo el mes de diciembre, como el periodo a ejecutar en la solución de los pronósticos, dado que es el mes en el que la ruta elegida presentó mayor flujo de pasajeros en la empresa caso de estudio. Adicional, se tomó la demanda de cada uno de los días de la semana durante cada año, desde el domingo hasta el sábado, con el fin de conocer la demanda pronosticada para un día siguiente, y de esta manera realizar la ejecución del modelo matemático.

De esta manera, se puede evidenciar que, para el periodo de diciembre del 2015, la demanda total de pasajeros presentada en la empresa caso de estudio, fue de 33243. Seguidamente, para el año 2016, se presentó una demanda de 33095 pasajeros, mostrando una leve disminución con respecto al año anterior.

Posteriormente, para el año 2017, se presentó una demanda de 35554 pasajeros, dando como resultado, un balance positivo frente a los dos años anteriores. Adicionalmente, para el año 2018, la empresa reportó de nuevo un balance positivo, teniendo como resultado una demanda de 35554 pasajeros, sosteniendo así la tendencia de incremento. Por último, para el año 2019 se obtuvo una demanda de 35111 usuarios, donde se presenta una leve disminución con respecto a los dos años anteriores, pero, aun así, obteniendo buenos resultados.

Tabla 3: Demanda (Di)

AÑO	SEMANA	DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
2015	1			923	935	967	1132	1162
	2	869	1062	776	1318	1147	1049	1078
	3	883	1106	1069	929	890	1073	1038
	4	883	1062	1095	1202	1308	762	1030
	5	1101	1124	1093	1415	1762		
2016	1					891	1055	980
	2	916	1187	1017	1103	720	1060	980
	3	1017	1085	902	863	899	1087	1083
	4	1070	1088	1075	1073	1061	1296	1237
	5	1011	1191	954	868	1045	1573	1708
2017	1						1241	1072
	2	858	1084	1201	998	1401	1016	967
	3	1123	1078	923	1001	978	1154	1148
	4	976	1201	1048	998	990	1256	1582
	5	892	1061	1233	1086	1031	1421	1667
	6	1385						
2018	1							1081
	2	978	1083	972	981	1024	1372	1066
	3	1210	1279	1027	1022	995	1178	1177
	4	1046	1183	1104	1036	1145	1239	1335
	5	1154	1024	962	1313	1042	1149	1374
	6	1460	1543					
2019	1	1051	1291	1130	236	1119	1411	1226
	2	1134	1376	906	933	892	1029	1024
	3	1068	1260	1154	1065	1118	1163	1308
	4	1086	1450	1101	861	1199	1093	1191
	5	1019	1493	1724				

Fuente. Elaboración propia

Cantidad de buses disponible (BD_{jk}) y capacidad (AD_{jk})

Como se observa en la Tabla 4, muestra la cantidad de vehículos de la ruta que hay por cada marca, adicional a esto la capacidad que posee cada uno de ellos, dando una totalidad de 29 buses para la ruta caso de estudio. Es de resaltar que, si la demanda de pasajeros sobrepasa la oferta vehicular, el modelo determinará la cantidad adicional de vehículos que serán requeridos para cumplir con la demanda presentada.

Tabla 4. Capacidad y Cantidad de buses

TIPO DE BUS	Mercedes Benz		Volkswagen	Nissan
Cantidad de buses	26	1	1	1
Capacidad del bus	19	17	19	19

Fuente. Elaboración propia

Costo total de un bus por día (CTB_{ijk}) y costo de un bus para un ciclo en la ruta (CB_{ijk})

Como se muestra en la Tabla 5, esta hace referencia a la cantidad monetaria requerida por cada bus para poder cumplir con su recorrido, es decir, todos los costos de los cuales cada bus debe asumir para poder cumplir con su ciclo. Para estos costos se tuvieron en cuenta tanto los operativos, como, por ejemplo, el combustible, lubricantes, llantas, entre otros, y los costos administrativos.

Como parámetros principales para el cálculo de los costes se tuvo en cuenta la longitud de la ruta caso de estudio, número de ciclos que realiza cada bus, kilómetros recorridos por día, kilómetros recorridos por mes y, por último, número de días trabajados por mes.

Tabla 5. Estructura de costos

ESTRUCTURA DE COSTOS \$/KM

CLASE DE VEHICULO	NIVEL DE SERVICIO
GRUPO B MICROBUS	CORRIENTE
Ruta	Roldanillo-Cali

LONGITUD DE RUTA (km)	
origen - destino	130
Ciclos. RECORRIDOS/DIA (doble sentido)	1
KILOMETROS/DIA	260
KILOMETROS/MES	6,760
No. DIAS/ MES	26

CONDICIONES DE OPERACIÓN						
ITEM	UNIDAD	CAMBIO (km)	PRECIO (\$)	\$/km	\$/MES	% Part
COSTOS OPERATIVOS						
COMBUSTIBLE	1.00 Gal	30	9,292	309.73	2,093,797	14.7%
ACEITE	1.00	10,000	700,000	70.00	473,200	3.3%
ARTICULOS DE LIMPIEZA	1.00	10,000	45,000	4.50	30,420	0.2%
ADITIVOS	1.00	15,000	50,000	3.33	22,533	0.2%
FILTRO ACEITE	1.00	5,000	110,000	22.00	148,720	1.0%
FILTRO COMBUSTIBLE	1.00	10,000	150,000	15.00	101,400	0.7%
FILTRO AIRE	1.00	15,000	50,000	3.33	22,533	0.2%
LUBRICANTES				118.17	798,807	5.6%
LLANTAS	6.00	80,000	650,000	48.75	329,550	2.3%
MANO DE OBRA CAMBIO ACEITE	2.00	10,000	45,000	9.00	60,840	0.4%
MANTENIMIENTO A.A.	1.00	10,000	100,000	10.00	67,600	0.5%
MONTALLANTAS	1.00	10,000	80,000	8.00	54,080	0.4%
LLANTAS				75.75	512,070	3.6%
REPUESTOS	1.00	6,760	550,000	81.36	550,000	3.9%
MANO DE OBRA	1.00	6,760	250,000	36.98	250,000	1.8%
MANTENIMIENTO				118.34	800,000	5.6%
SALARIO CONDUCTOR	1.00	6,760	1,000,000	147.93	1,000,000	7.0%
DOMINICALES	1.00	6,760	266,664	39.45	266,664	1.9%
RELEVO (Reemplazo de conductor)	1.00	6,760	189,000	27.96	189,000	1.3%
DOTACIÓN	1.00	40,560	420,000	10.36	70,000	0.5%
AUXILIO TRANSPORTE	1.00	6,760	117,172	17.33	117,172	0.8%
PRIMAS/VAC/CE S/INT.	1.00	6,760	218,200	32.28	218,200	1.5%
PENS/SALUD/ARL	1.00	6,760	163,500	24.19	163,500	1.1%
CAJA/SENA/ICBF	1.00	6,760	40,000	5.92	40,000	0.3%
SALARIOS Y PRESTACIONES				305.40	2,064,536	14.5%
LAVADO	1.00	3,380	35,000	10.36	70,000	0.5%
ENGRASE	1.00	3,380	8,000	2.37	16,000	0.1%
PETROLIZADA	1.00	3,380	5,000	1.48	10,000	0.1%
LAV. MOTOR	1.00	3,380	8,000	2.37	16,000	0.1%
ASEO DIARIO	1.00	260	20,000	76.92	520,000	3.7%
GRUA	1.00	20,280	140,000	6.90	46,667	0.3%
COVID-19 (PROT. PERSONAL - DES	1.00	260	5,000	19.23	130,000	0.9%
SERVICIO ESTACION				119.63	808,667	5.7%
TOTAL COSTOS OPERATIVOS				1,047.02	7,077,877	49.7%

COSTOS ADMINISTRATIVOS						
PARQUEADERO	1.00	6,760	45,000	6.66	45,000	0.3%
IMPUESTOS	1.00	81,120	180,000	2.22	15,000	0.1%
ADMINISTRACION	1.00	6,760	1,900,000	281.07	1,900,000	13.3%
GPS - WIFI - SAYCO	1.00	6,760	100,000	14.79	100,000	0.7%
TOTAL IMPUESTOS Y OTROS				304.73	2,060,000	14.5%
SEGUROS RCC Y RCE	1.00	81,120	2,165,000	26.69	180,417	1.3%
SOAT	1.00	81,120	1,363,150	16.80	113,596	0.8%
PERDIDA TOTAL	1.00	6,760	1,500,750	222.00	1,500,750	10.5%
REVISIONES TECNICOMECHANICAS	1.00	13,520	60,000	4.44	30,000	0.2%
TOTAL SEGUROS				269.94	1,824,763	12.8%
TASA DE USO TERMINAL	1.00	260	18,000	69.23	468,000	3.3%
PEAJES	8.00	260	13,500	415.38	2,808,000	19.7%
TOTAL OTROS COSTOS				484.62	3,276,000	23.0%
TOTAL COSTOS ADMINISTRATIVOS				629.11	7,160,763	50.3%
GRAN TOTAL DE COSTOS				1,676.13	14,238,639	100.0%

Fuente. Elaboración propia

3.1 RESULTADOS

El modelo y los pronósticos fueron desarrollados usando el lenguaje de programación Python en su versión 3.10 a través del entorno integrado de desarrollo de JetBrains llamado PyCharm, utilizando Python Pip como gestor de librerías. Para el modelo se utilizó la librería PuLp con el solver predeterminado de esta CBC(Coin-or branch and cut). Para los pronósticos se utilizaron una serie de librerías que incluyen en sí mismas la característica de obtener cada uno de sus parámetros en niveles óptimos para así lograr un buen resultado, estas librerías fueron sklearn, statsmodels y pandas. Esto se realizó en un equipo portátil MacBook Pro 2021 con procesador M1 Pro (10-core CPU, 16-core GPU), con 16 GB de Memoria RAM tipo LPDDR5 a 6400 MHz, capacidad de 1 TB SSD(M2) con sistema operativo macOS Monterrey en su última versión (12.5 - 21G72).

Además, el código en Python fue estructurado siguiendo un patrón de diseño Orientado a Objetos con el objetivo de lograr una estructura sólida y simple de entender, también por medio de la librería PyInstaller, se generó un archivo binario que facilita la portabilidad del código hacia cualquier computador que no tenga Python instalado, pues, este archivo incluye todo lo necesario para que tanto el modelo como los pronósticos se pudiesen ejecutar sin ningún problema.

Sin embargo, para darle un valor adicional al proyecto, se desarrolló una API y un software de escritorio, con la finalidad de brindar una herramienta que pueda ser útil a aquellas personas que se enfrentan a una problemática similar a la descrita en este trabajo de grado. Tanto el software como la API utilizaron el lenguaje de programación JavaScript, pero, que en este caso, se usó un superset de este llamado TypeScript, creado por Microsoft y actualmente usado por grandes compañías como las pertenecientes a GAFAM (Google, Apple, Meta, Amazon y Microsoft), además de utilizar un gestor de paquetes de NodeJS basado en NPM

llamado Yarn. Cabe resaltar que tanto la API como el software utilizaron librerías de código abierto.

Para la API, se implementó una librería llamada ExpressJS una infraestructura para desarrollar aplicaciones web y APIs, en conjunto de otra librería llamada Prisma, un ORM de NodeJS compatible con TypeScript configurado para ser utilizado con el gestor de bases de datos MySQL. Esto se desarrolló siguiendo el patrón de diseño MVC(Modelo-Vista-Controlador), y que a través de la librería de NodeJS llamada child_process pudo ser integrado con el archivo binario de Python generado anteriormente para que se pudiesen ejecutar tanto el modelo como los pronósticos desde cualquier parte. También fueron creados una serie de recursos llamados datasets que hacen referencia al modelo matemático y forecasts referente a los pronósticos, aplicando el concepto CRUD y utilizando el patrón de diseño llamado Patrón de Servicios (Service Pattern) en donde toda la lógica de cada recurso estará en un archivo de servicios para mantener el modularidad del código, así como su extensibilidad. Con base en esto, se crearon una serie de archivos llamados controladores, quienes hacen uso de servicios con la finalidad de seguir el principio de Responsabilidad Única (Single Responsibility). Por último, utilizando las funciones principales de ExpressJS, se definieron una serie de rutas que utilizan los controladores anteriormente creados, con la finalidad de ser un puente en la comunicación entre la API y el software.

Para el software de escritorio se implementaron cuatro librerías principales, la primera ElectronJS creada por GitHub para desarrollar aplicaciones de escritorio usando tecnologías como HTML, CSS y JavaScript compatible con todos los sistemas operativos, seguido de ReactJS, librería de JavaScript creada por Meta para desarrollar interfaces de usuario basadas en componentes, en conjunto con React Router para la navegación dentro de la aplicación. Por consiguiente, se utilizó TailwindCSS una librería de CSS que se basa en ofrecer clases CSS de utilidad que son aplicadas directamente al código HTML, lo que permite que el tamaño de los archivos CSS sea muy pequeño y, por último, Vite, una herramienta de frontend creada por Evan You autor de VueJS, cuyo objetivo es facilitar la creación de proyectos en JavaScript de una manera sencilla e increíblemente rápida gracias a que usa módulos nativos, haciendo que el peso del archivo compilado sea muy pequeño. Este software tiene como fin ser una herramienta que el usuario pueda interactuar de manera visual tanto con el modelo matemático como con los pronósticos, dado que esta se conecta de manera directa con la API.

DATOS DE ENTRADA

Para aclarar, en el software todo lo relacionado con el modelo matemático estará bajo el nombre de Dataset, y respecto al Pronóstico tendrá el nombre de Forecast.

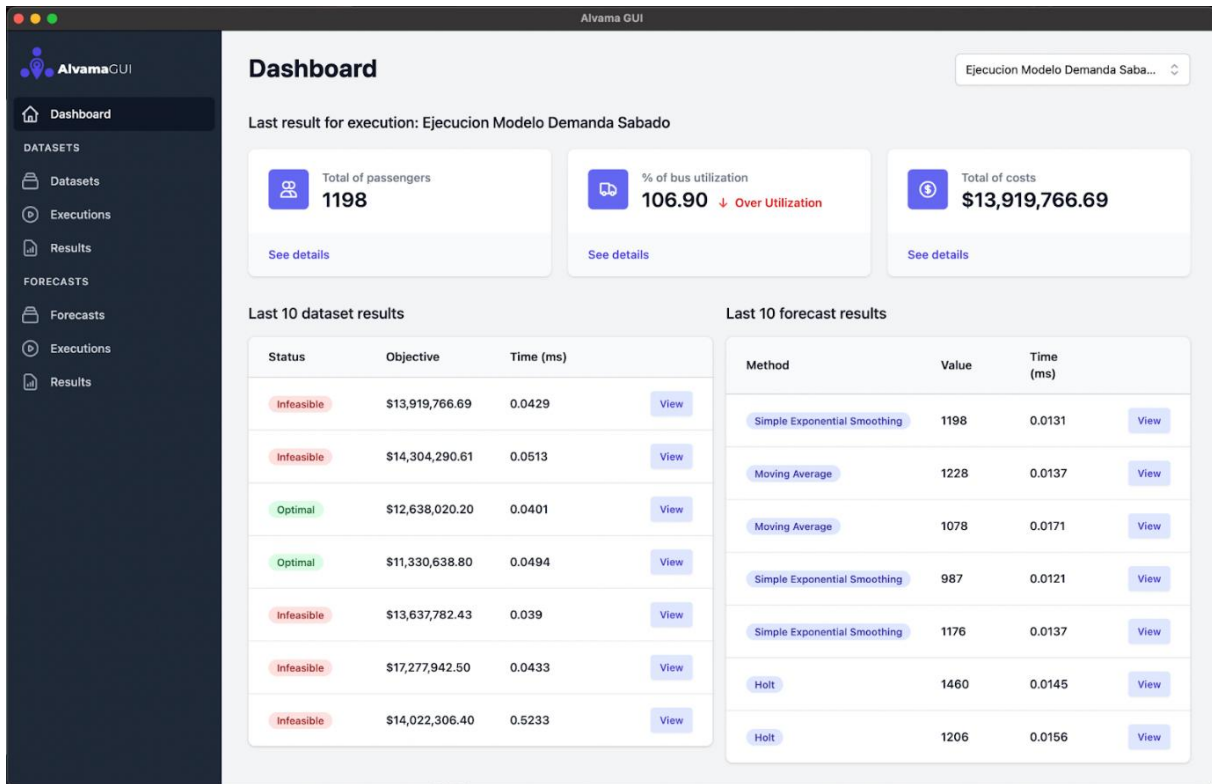
Ahora bien, gracias al software, la forma en la que se puede alimentar tanto el modelo matemático como el pronóstico será por medio de una serie de formularios dinámicos cuya información será almacenada en una base de datos(MySQL) para así poder ser reutilizada cuantas veces sea necesario. Cabe resaltar que se tiene la

característica de importar los datos por medio de archivos con formato JSON o CSV, esto, para facilitar aún más el ingreso de grandes series de datos que pueden tomar mucho tiempo al digitarse de manera manual. En complemento, cada Dataset y Forecast es acompañado de una ejecución, en este caso en el software será visto como “Executions”, allí el usuario podrá asignarle un nombre a la ejecución y podrá seleccionar de una lista desplegable que posee los datos que han sido creados anteriormente dependiendo del recurso, ya sea para un pronóstico o el modelo matemático, el grupo de datos para dicha ejecución. Luego de que el usuario cree una ejecución será redirigido a la lista de ejecuciones en donde podrá dirigirse a la sección de los resultados y ver los resultados de la reciente ejecución respecto al recurso elegido. (Ver Anexo 3)

RESULTADOS DE LAS EJECUCIONES DEL MODELO MATEMÁTICO Y PRONÓSTICOS

El software posee una sección se encarga de mostrar de manera breve los resultados de una ejecución en específico que puede ser seleccionada a través de un menú desplegable en la parte superior derecha. Esta sección puede ser localizada al dar clic en el enlace del menú desplegable llamado “Dashboard”, dentro de esta se puede evidenciar que está dividida en dos partes, la primera se encarga de mostrar 3 recuadros. El primer recuadro trata del cálculo de la demanda total, el segundo sobre el porcentaje de utilización de los buses y el último, los costos totales, esto, con el objetivo de brindarle al usuario un resumen rápido de la ejecución seleccionada. Cabe mencionar que, al dar clic en la parte inferior de cada recuadro, el usuario será dirigido a los resultados específicos de dicha ejecución. Ahora bien, en la segunda parte se pueden observar dos tablas cuya finalidad es enlistar las últimas 10 ejecuciones de los recursos de Dataset y Forecast. (Ver Ilustración 3)

Ilustración 3: Tablero de resultados (Dashboard).



Fuente. Elaboración propia

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en lo explicado anteriormente referente a la manera en que los datos deben ingresarse al software, se procede a realizar la respectiva ejecución de los pronósticos y el modelo matemático teniendo en cuenta los valores de demanda consolidados por la empresa caso de estudio, los costos requeridos para el funcionamiento de un bus, en conjunto con la cantidad de buses adjudicados a la ruta Roldanillo Cali (Ruta elegida). Por consiguiente, se procede a realizar la ejecución del modelo matemático por medio del software, utilizando la integración con los pronósticos de la demanda, para así, dar solución al problema de dimensionamiento de flota terrestre vehicular. Siendo así, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 6. Resultados Pronósticos

PRONOSTICOS	PROMEDIO MOVIL		SUAV EXP. SIMPLE		SUAV. EXP. DOBLE	
DÍA	ECM	VAL DEM	ECM	VAL DEM	ECM	VAL DEM
DOMINGO	23927,9	1072	21765,6	1097	18012,8	1206
LUNES	15766,3	1401	15218,5	1401	13085,1	1460
MARTES	35305,7	1412	32924,8	1176	39959,2	1678
MIERCOLES	63258,1	924	54549,4	987	105004,2	905
JUEVES	9026,8	1078	48399,3	1070	73458,5	1127
VIERNES	12207,1	1228	29435,6	1175	34770,5	1103
SABADO	46736,1	1198	44462,8	1198	56563,1	1207

Fuente. Elaboración propia

En primer lugar, se ingresan los datos de la demanda presentada en cada uno de los días durante los cinco años anteriores (Ver tabla 3) al recurso de los pronósticos en el software, y se crea para cada día su respectiva ejecución, cuyo proceso se encargará de calcular el pronóstico de la demanda por medio de tres tipos de métodos, los cuales son, promedio móvil, suavización exponencial simple y suavización exponencial doble, seleccionando como valor de demanda cuyo resultado contenga el menor error cuadrático medio (ECM). Por lo tanto, se analiza que, para el día domingo, el pronóstico de suavización exponencial doble fue elegido con un valor de 1026 pasajeros y un error cuadrático medio de 18012,8. Para el día lunes, fue el pronóstico de suavización exponencial doble, con un valor de 1460 pasajeros y un error cuadrático medio de 13085,1. Para el día martes, dado que la tendencia de demanda de pasajeros es diferente a la presentada en los dos días anteriores, fue seleccionado el pronóstico de suavización exponencial simple, donde se obtuvo una demanda de 1176 pasajeros, con un error cuadrático medio (ECM) de 32924,8. Para el día miércoles, el pronóstico elegido fue el de suavización exponencial simple, cuyos resultados dieron una demanda de 987 pasajeros, con un error cuadrático medio (ECM) de 54549,4. Seguidamente, para el día jueves, se tomó el pronóstico de promedio móvil, con un error cuadrático medio de 9026,8, y una demanda pronosticada de 1078 pasajeros. Para el día viernes, el promedio móvil fue seleccionado, con un error cuadrático medio (ECM) de 12207,1 y una demanda de 1228 pasajeros. Por último, para el día sábado se tuvo como resultado una demanda de 1198 pasajeros, y un error cuadrático medio (ECM) de 44462,8, que corresponde al pronóstico de suavización exponencial simple.

De esta manera, utilizando los valores pronosticados de la demanda para cada día de la semana anteriormente calculados, se procede a crear la ejecución del modelo matemático para cada día, con la finalidad de determinar la cantidad de buses que serán utilizados de cada marca, en conjunto de los costes totales, para cada día.

Adicionalmente, se puede determinar si la cantidad de vehículos a usar (Ver tabla 4) es suficiente para cumplir con la demanda proyectada. (Ver Tabla 6)

Tabla 7. Cantidad de buses por día

MODELO BASE							
TIPO DE BUS POR MARCA	MERCEDES BENZ		VOLKSWAGEN	NISSAN			
TAMAÑO DE BUS	GRANDE	PEQUEÑO	GRANDE	GRANDE	CANTIDAD TOTAL		
CAPACIDAD	19	17	19	19	DE BUSES		
CANTIDAD	26	1	1	1	29		
DÍAS					TOTAL DE BUSES	BUSES EXTRA	% UTILIZACION
DOMINGO	26	4	1	1	32	3	110,3%
LUNES	26	11	1	1	39	10	134,5%
MARTES	26	3	1	1	31	2	106,9%
MIÉRCOLES	26	0	0	0	26	-3	89,7%
JUEVES	26	1	1	1	29	0	100,0%
VIERNES	26	4	1	1	32	3	110,3%
SÁBADO	26	3	1	1	31	2	106,9%

Fuente. Elaboración propia

En la tabla anterior, se presenta la cantidad de vehículos que tiene la empresa caso de estudio, donde se filtran por la marca y el tamaño que posee cada uno de estos. De esta manera, para la marca Mercedes Benz, se cuenta con 26 buses con una capacidad de 19 puestos, y un bus de 17 puestos. Seguidamente, para la marca de VOLKSWAGEN, se cuenta con 1 bus, el cual tiene una capacidad de 19 puestos. Por último, se cuenta con un bus de marca Nissan, donde la capacidad de este es de 19 puestos.

De esta manera, dado los resultados del modelo matemático, para el día domingo, fue necesario la totalidad de los buses de la ruta elegida, requiriendo de 3 autobuses Mercedes Benz de tamaño pequeño adicionales, para un total de 32 autobuses, obteniendo un porcentaje de utilización de la flota del 110,3%. Seguidamente, el modelo arrojó que para el día lunes era necesario de 39 autobuses, bajo la necesidad de suplir la demanda presentada, teniendo de esta manera, un porcentaje de utilización del 134,5%.

Para el día martes, se requirió de 31 buses, adicionando dos buses a la cantidad original de la empresa caso de estudio, de esta manera se presenta un porcentaje de utilización de 106,9%. Caso contrario pasa con los días miércoles y jueves, en donde sus valores obtuvieron resultados óptimos, pues, para el primer día (Miércoles), solo se utilizaron 26 buses de un total de 29 de estos, es decir, un porcentaje de utilización del 89,7%, y para el segundo día (Jueves) se puede evidenciar que se utiliza el 100% de la flota vehicular de autobuses, por lo tanto, en ambos días se puede concluir que se cumple de manera satisfactoria con la demanda diaria de pasajeros, con la cantidad de vehículos que posee la empresa caso de estudio para esta ruta en específico

En este mismo orden, para el día viernes, dado la demanda pronosticada, se requirió de una totalidad de 32 buses, donde se adicionaron 3 autobuses al tamaño de flota

de la empresa caso de estudio. Finalmente, para el sábado, fue necesario una totalidad de 31 autobuses, dando el modelo matemático como sugerencia, adicionar dos buses al tamaño de flota con la que cuenta la empresa caso de estudio.

Tabla 8. Costos totales

DÍA	COSTO TOTAL
DOMINGO	\$14,022,306.40
LUNES	\$17,277,942.50
MARTES	\$13,637,782.43
MIÉRCOLES	\$11,330,638.80
JUEVES	\$12,638,020.20
VIERNES	\$14,304,290.61
SABADO	\$13,919,766.69

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 8 se encuentran los resultados del costo total para cada uno de los días en la empresa, caso de estudio, considerando el costo por kilómetro, la cantidad buses utilizados para ese día y la distancia recorrida de estos.

De esta manera, para el día domingo los costos totales fueron de \$14,022,306.40, esto debido a que se sobrepasó la cantidad de vehículos disponibles en la ruta, donde se adicionaron 3 vehículos pequeños a causa de la demanda pronosticada. Seguidamente, para el día lunes, se presentó un costo total de \$17,277,942.50, siendo este el mayor costo total, dado que se requirió de 39 buses, adicionando 10 buses al tamaño de flota de la empresa caso de estudio.

Para el día martes, el costo total, fue de \$13,637,782.43, teniendo una disminución frente a los días anteriores, esto a causa de que solo requirió de 31 buses, teniendo así una adición de 2 buses a la flota original. Seguidamente, para el día miércoles, dado que solo se requirió de 26 buses, dejando así, un costo total para este día de \$11,330,638,30, siendo este el costo menor frente a los demás días.

Por otra parte, para el día jueves, el costo total fue de \$12,638,020.20, donde para este día, se requirió de la totalidad de la flota de la empresa caso de estudio. Continuando, para el viernes, los costos sufrieron una elevación, dado que se adicionaron 3 buses a la flota original, dando como resultado un costo total de \$14,304,290,61. Por último, para el sábado se presentó una totalidad de 31 vehículos, implicando un costo de total de \$13,919,766.69.

Con base en el análisis anterior, para concluir, se puede considerar que los días miércoles y jueves son los que poseen mejores resultados en ambas perspectivas, es decir, utilización de la flota y minimización de los costos totales, puesto que para el día miércoles respecto a la utilización la flota, sólo se usaron 26 buses de 29 disponibles, dejando 3 vehículos libres, lo que puede beneficiar a la empresa caso de estudio al momento de tomar decisiones tales como, ¿qué vehículos deben ir a

mantenimiento? o, ¿qué vehículos de los disponibles pueden ser utilizados en otra ruta?, además en términos de costos totales, como se menciona anteriormente fue el día que obtuvo el menor valor en toda la semana. Ahora bien, el día jueves presenta un comportamiento similar, a diferencia de que en este se usa el 100% de la flota, lo que puede referirse a que se usó de manera óptima la flota vehicular y, también, fue el segundo día cuyo valor de costo tal fue menor.

3.2 ANÁLISIS ESCENARIOS

En este apartado, se plantean tres escenarios en los cuales se harán una serie de cambios en la configuración, tanto del tipo como del tamaño de la flota con el fin de poder realizar un análisis comparativo entre cada uno de los escenarios, frente al resultado original. Siendo así, dichos escenarios constaran de las siguientes características, el primero será una flota de tipo homogénea, en el segundo el tamaño de flota será aumentada a un total de 35 vehículos y, por último, la flota será de carácter completamente heterogénea.

3.2.1 FLOTA HOMOGÉNEA

Como se evidencia en la tabla 9, la cantidad de buses a utilizar cada día no difiere del resultado original, esto a causa de que en el modelo original se hizo uso de 28 buses de 19 pasajeros y uno de 17 pasajeros, y para el escenario 1, solo se agruparon las marcas de los buses en una sola en general, que en esto caso será bajo la marca Mercedes Benz, conservando la cantidad de estos con la misma capacidad de 19 pasajeros. Debido a esto, se obtuvieron resultados similares comparándose al original, aunque cabe resaltar que para este caso el escenario 1 presentaría una mejor conveniencia, dado que habrá dos puestos adicionales, para un total de cuatro puestos, dos de ida y dos de vuelta.

Tabla 9. Análisis de escenario #1

ANÁLISIS DE ESCENARIO CASO #1					
TIPO DE BUS POR MARCA	MERCEDES BENZ				
TAMAÑO DE BUS	GRANDE	CANTIDAD TOTAL			
CAPACIDAD	19	DE BUSES			
CANTIDAD	29	29			
DÍAS		TOTAL DE BUSES	BUSES EXTRA		% UTILIZACION
DOMINGO	31 	31	2		106,9%
LUNES	38 	38	9		131,0%
MARTES	30 	30	1		103,4%
MIÉRCOLES	26 	26	0		89,7%
JUEVES	29 	29	0		100,0%
VIERNES	32 	32	3		110,3%
SÁBADO	31 	31	2		106,9%

Fuente. Elaboración propia

Por otra parte, como se observa en la tabla 10, los costos totales en comparación a los resultados originales reflejan una disminución, a causa de la agrupación de los vehículos en un solo tipo de marca convirtiendo la flota completamente homogénea. Además, en este escenario los días miércoles y jueves presentan el mismo

comportamiento presentado en los resultados originales, puesto que los costos totales al ser comparados son exactamente los mismos, a razón de que el uso de la flota también para estos días es igual. También se logra evidenciar que el lunes fue el que mayor reducción tuvo en los costos totales, ya que al realizarse la respectiva comparación se consigue una diferencia de \$534.285,81, seguido del viernes con \$221.270,12, continuando con el domingo cuya diferencia fue de \$191.587,42, y, por último, los días sábado y martes en donde dicha comparación deja valores residuales de \$180.793,64 y \$151.111,33 respectivamente, dejando así un total de \$1.279.048,32 de diferencia entre ambos.

Tabla 10 Costos totales escenario #1

COSTOS TOTALES		
DÍA	ESCENARIO #1	DIFERENCIA ESC VS ORIGINAL
DOMINGO	\$13.830.718,98	\$191.587,42
LUNES	\$16.743.656,69	\$534.285,81
MARTES	\$13.486.671,10	\$151.111,33
MIERCOLES	\$11.330.638,80	\$0,00
JUEVES	\$12.638.020,20	\$0,00
VIERNES	\$14.083.020,49	\$221.270,12
SABADO	\$13.738.973,05	\$180.793,64

Fuente. Elaboración propia

3.2.2 FLOTA AUMENTADA

Para el escenario 2, se puede evidenciar en la tabla 11 que el cambio con respecto al modelo original es amplio, esto a causa de que, al tener una flota más grande, se tendría una mayor oferta vehicular, conllevando a tener mayor probabilidad de suplir la demanda requerida.

Por consiguiente, para la oferta vehicular en este escenario, puede satisfacer la demanda de 6 de los 7 días, a excepción del lunes, donde la demanda pronosticada es alta con respecto a la modificación de la oferta vehicular.

Tabla 11. Análisis de escenario #2

ANÁLISIS DE ESCENARIO CASO #2							
TIPO DE BUS POR MARCA	MERCEDES BENZ		VOLKSWAGEN	NISSAN			
TAMAÑO DE BUS	GRANDE	PEQUEÑO	GRANDE	GRANDE	CANTIDAD		
CAPACIDAD	19	17	19	19	TOTAL DE BUSES		
CANTIDAD	26	4	3	2	35		
DÍAS					TOTAL DE BUSES	BUSES EXTRA	% UTILIZACI
DOMINGO	26	2	3	1	32	0	91
LUNES	26	8	3	2	39	4	111
MARTES	26	0	3	2	31	0	88
MIÉRCOLES	26	0	0	0	26	0	74
JUEVES	26	0	3	0	29	0	82
VIERNES	26	2	3	2	33	0	94
SÁBADO	26	2	3	1	32	0	91

Fuente. Elaboración propia

De esta manera, para el domingo, se requirió de 32 buses para suplir la demanda requerida, por lo tanto, se tuvo solo un 91,4% de utilización de la flota vehicular. Seguidamente, para el lunes, se necesitaron 39 buses a fin de satisfacer la demanda presentada. De tal manera que fue necesario adicionar 4 buses a la cantidad total de la flota. Posteriormente, para el martes, solo se requirieron de 31 buses, supliendo así la totalidad de la demanda, utilizando solo el 88,6% de la oferta vehicular. Ulteriormente, para el miércoles, solo se requirió de 26 vehículos, esto a causa de la demanda pronosticada, la cual fue la más baja frente a los otros días. Por lo tanto, para suplir dicha demanda, solo fue necesario el 74,3% de los buses disponibles. De igual manera, para el jueves, solo fue necesario el 82,9% de la flota disponible, respondiendo así a la demanda presentada para este día. Seguidamente, para el viernes, bajo la demanda que se pronosticó para este día, solo fue necesario el 94,3% de la capacidad vehicular, es decir, una totalidad de 33 buses. Por último, para el sábado, solo fue necesario 32 buses, cumpliendo así de manera satisfactoria, la demanda presentada para dicho día.

Adicionalmente, se realizó un análisis de costos del escenario, frente al resultado original (Ver tabla 12), donde se pudo concluir que, para los días domingo, lunes, y martes, los costos originales fueron mayores a los obtenidos dentro del escenario, generando así una reducción en estos mismos. Adicionalmente, tanto los miércoles y jueves, el escenario tuvo el mismo comportamiento frente al resultado original, aunque se resalta que, para el escenario, se cuenta con más buses disponibles, por lo cual tiende a ser un suplemento hacia una necesidad, como lo puede ser un vehículo dañado o varado. Por último, para los días viernes y sábado, el costo total del escenario, fue mayor al costo obtenido en el resultado original, sin embargo, la capacidad vehicular utilizada fue menor, esto dado al aumento de la oferta vehicular presentada en el escenario.

Tabla 12: Costos totales escenario #2

COSTOS TOTALES		
DÍA	ESCENARIO #2	DIFERENCIA ESC VS ORIGINAL
DOMINGO	\$13.945.401,60	\$76.904,80
LUNES	\$17.124.132,83	\$153.809,67
MARTES	\$13.509.607,80	\$128.174,63
MIERCOLES	\$11.330.638,80	\$0,00
JUEVES	\$12.638.020,20	\$0,00
VIERNES	\$14.381.195,40	(\$76.904,79)
SABADO	\$13.945.401,60	(\$25.634,91)

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 FLOTA HETEROGÉNEA

Para este escenario, teniendo en cuenta que la flota es totalmente de carácter heterogénea, los resultados en la totalidad de los días no fueron óptimos, es decir, la capacidad presentada y la cantidad de vehículos adjudicados en este escenario, no satisfacen la demanda pronosticada para cada uno de los días, por lo que esto representaría mayores costos totales (Ver Tabla 13) para la empresa caso de estudio, dado que en todos los casos se requieren buses extras si se desea satisfacer la demanda presentada, que van desde una cantidad de 6 buses adicionales (día miércoles), como en el peor de los casos, requerir de 30 buses más (día lunes) presentándose un porcentaje de utilización vehicular por encima del 100% de manera general. La principal causa de este comportamiento radica en que se utiliza un mismo número de vehículos en cada una de las marcas a excepción de la marca Nissan en donde sólo se usan 4 vehículos pequeños, lo que conlleva a que la cantidad de personas a transportar en cada recorrido sea menor comparado al escenario original, ya que en este caso se utilizan en menor instancia los vehículos de tamaño grande.

Tabla 13. Análisis de escenario #3

ANÁLISIS DE ESCENARIO CASO #3										
TIPO DE BUS POR MARCA	MERCEDES BENZ		VOLKSWAGEN		NISSAN					
TAMAÑO DE BUS	GRANDE	PEQUEÑO	GRANDE	PEQUEÑO	GRANDE	PEQUEÑO	CANTIDAD TOTAL			
CAPACIDAD	19	17	19	17	19	17	DE BUSES			
CANTIDAD	5	5	5	5	5	4	29			
DÍAS							TOTAL DE BUSES	BUSES EXTRA	% UTILIZACION	
DOMINGO	5	5	5	5	5	8	33	2	113,8%	
LUNES	5	5	5	5	5	16	41	10	141,4%	
MARTES	5	5	5	5	5	7	32	2	110,3%	
MIÉRCOLES	5	5	5	5	5	3	28	0	96,6%	
JUEVES	5	5	5	5	5	4	29	0	100,0%	
VIERNES	5	5	5	5	5	9	34	3	117,2%	
SÁBADO	5	5	5	5	5	8	33	2	113,8%	

Fuente. Elaboración propia

Seguidamente, analizando la Tabla 14, referente a los costos totales obtenidos, se logra evidenciar un gran aumento de estos a causa de la sobre utilización de la flota vehicular y que, al ser comparado con el resultado original, esta diferencia se hace aún más notable, siendo el lunes el día que mayor costo representa, dado que para este día se presentó el mayor valor de demanda pronosticada. De manera general el presente escenario es el que peor resultados obtiene desde las dos perspectivas, es decir, porcentaje de utilización vehicular y costos totales.

Tabla 14: Costos totales escenario #3

COSTOS TOTALES		
DÍA	ESCENARIO #3	DIFERENCIA ESC VS ORIGINAL
DOMINGO	\$20.395.149,84	(\$6.372.843,44)
LUNES	\$25.929.731,10	(\$8.651.788,60)
MARTES	\$19.741.459,14	(\$6.103.676,71)
MIÉRCOLES	\$15.623.207,73	(\$4.292.568,93)
JUEVES	\$17.606.069,52	(\$4.968.049,32)
VIERNES	\$20.874.523,02	(\$6.570.232,41)
SABADO	\$20.220.832,32	(\$6.301.065,63)

Fuente: Elaboración propia

Por último, dentro de los tres escenarios evaluados en comparación con los resultados originales, se logra llegar a la conclusión que el escenario cuya flota vehicular fue aumentada a 35 vehículos logra satisfacer la demanda pronosticada en 6 de los 7 días y adicionalmente presenta una disminución frente a los costos totales del resultado original de manera global, sin embargo para los días viernes y sábado se presenta un mayor costo, sin embargo, esto se da a causa de una mayor

utilización de la oferta vehicular, pero todo bajo la finalidad de satisfacer la demanda presentada.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente proyecto, se evidenció un problema de dimensionamiento de flota dentro de una empresa de transporte de pasajeros, donde debido a la alta circulación de personas de una ciudad a otra, especialmente en las temporadas de vacaciones, se han visto afectados en el transporte, esto a causa de la limitación de la flota de vehículos y a las pocas herramientas de logística con que las empresas cuentan.

La importancia de este proyecto radica en llevar a cabo un dimensionamiento de flota de vehículos, donde por medio de una demanda presentada en los años anteriores y haciendo uso de la herramienta de pronósticos, se calcula una demanda a futuro, en este caso la demanda para el día siguiente, conllevando esto a conocer cuántos vehículos se requiere para suplir la demanda pronosticada. Adicionalmente, el modelo tiene también la funcionalidad de presentar cuántos buses adicionales se requiere, en caso de que la demanda supere la oferta. de la misma manera, el modelo da a conocer el costo total dados en la empresa por los vehículos utilizados para cada día, donde se calculan por medio de los costos por kilómetro de los vehículos, la distancia entre el destino y el origen y la cantidad de ciclos presentada por la flota de vehículos.

De este modo, para el desarrollo del primer objetivo, se realizó una revisión bibliográfica con la finalidad de analizar los factores críticos planteados por diferentes autores que intervienen en el problema de dimensionamiento de flota terrestre vehicular. Como resultado de esta, se establecieron los factores críticos más destacados para el desarrollo del modelo. Estos hallazgos fueron fundamentales para la ejecución de los objetivos siguientes, dado que facilitó identificar cuáles eran los aspectos más importantes en la elaboración del modelo, y cuáles eran semejantes al dimensionamiento de flota terrestre vehicular.

Después del desarrollo del primer objetivo, se formuló un modelo de toma de decisiones que considera los factores críticos asociados al dimensionamiento de flota terrestre vehicular. Como punto de partida se definieron los supuestos que se implementaron en el modelo con el fin de dar continuidad en la ejecución del problema, se determinaron las variables de decisión, parámetros y restricciones, asimismo la interacción entre estas y su efecto en la función objetivo.

De esta manera, se llevó a cabo la ejecución del modelo donde se evaluaron los resultados obtenidos y el comportamiento de las variables con respecto a la empresa caso de estudio. Como resultado del escenario original, se obtuvieron las cantidades de vehículos a utilizar por cada día (Ver tabla 7) como también el total de los costos para cada uno de estos (Ver tabla 8). Cabe resaltar que, de los 7 días de la semana, el modelo arrojó que 2 de ellos pueden suplir la demanda con la cantidad de buses adjudicados a la ruta. Por el contrario, para los otros 5 días, la oferta de vehículos asignada no supe la demanda pronosticada, viendo así la necesidad de contratar

buses, sea de la misma empresa caso de estudio, o de una empresa terciaria, para suplir la demanda presentada.

Para finalizar, se recomienda para trabajos futuros considerar el escenario de diferentes periodos, como también de diferentes rutas, donde se pueda hacer un análisis de la demanda de pasajeros y la posible oferta de buses para el resto de los meses. También se recomienda incluir otro tipo de pronósticos, como los son Croston y Winters, para así obtener una mayor probabilidad de acierto en el pronóstico frente a la demanda esperada.

Bajo la estructura de costos (\$/Km), es importante tener en cuenta para investigaciones a futuro otros tipos de costo, como lo es el costo de capital, es decir, dar un tiempo estimado para la recuperación del capital invertido en valor del vehículo junto al costo de la ruta.

Por último, se sugiere hacer un análisis de la demanda en tiempo real, es decir, hacer un seguimiento minucioso a la demanda presentada en lapsos de tiempo más cortos, sea en horas o minutos, por medio de inteligencia artificial (Open AI) o por pronósticos, con el fin de determinar nuevas decisiones como lo puede ser el ruteo de vehículos, llevando esto a una unión de dimensionamiento de flota y hora de salida de estos por cada día.

REFERENCIAS

- Alkheder, S., Savsar, M., Alrukaibi, F., & Zaqzouq, A. (2019). Optimal Fleet Size for Kuwait Public Transport Company Based on Integer Linear Programming. *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC 2019*, 981–986. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2019.8917210>
- Alonso-González, M. J., Liu, T., Cats, O., Van Oort, N., & Hoogendoorn, S. (2018). The Potential of Demand-Responsive Transport as a Complement to Public Transport: An Assessment Framework and an Empirical Evaluation. *Transportation Research Record*, 2672(8), 879–889. <https://doi.org/10.1177/0361198118790842>
- Baykasoğlu, A., Subulan, K., Taşan, A. S., & Dudaklı, N. (2019). A review of fleet planning problems in single and multimodal transportation systems. *Transportmetrica A: Transport Science*, 15(2), 631–697. <https://doi.org/10.1080/23249935.2018.1523249>
- Brandão, J. (2009). A deterministic tabu search algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 716–728. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.059>
- Carlos Fabian Flórez Valero, & Pedro Luís Jiménez Póveda. (2007). Determinación de variables de ajuste para la racionalización de un diseño de operación de flota en transporte público colectivo de pasajeros. *Revista de Ingeniería e Investigación*, 27(2), 85–91. <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v27n2/v27n2a12.pdf>
- Ceder, A. A. (2005). Bus Estimation of Fleet Size. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 3–10.
- Chakroborty, P., Deb, K., & Sharma, R. K. (2001). Optimal fleet size distribution and scheduling of transit systems using genetic algorithms. *Transportation Planning and Technology*, 24(3), 209–225. <https://doi.org/10.1080/03081060108717668>
- Costa Salas, Y. jose, & Castaño Perez, N. J. (2015). Simulation and optimization for fleet size determination in the supply-distribution logistic operations. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(5), 1373–1380. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0974-1>
- Coutinho, F. M., van Oort, N., Christoforou, Z., Alonso-González, M. J., Cats, O., & Hoogendoorn, S. (2020). Impacts of replacing a fixed public transport line by a demand responsive transport system: Case study of a rural area in Amsterdam. *Research in Transportation Economics*, 83(June). <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100910>
- Diana, M., Dessouky, M. M., & Xia, N. (2006). A model for the fleet sizing of demand responsive transportation services with time windows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(8), 651–666. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.09.005>

- Eshragh, A., Esmailbeigi, R., & Middleton, R. (2020). An analytical bound on the fleet size in vehicle routing problems: A dynamic programming approach. *Operations Research Letters*, 48(3), 350–355. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2020.04.007>
- Gkiotsalitis, K., & Cats, O. (2021). Public transport planning adaption under the COVID-19 pandemic crisis: literature review of research needs and directions. *Transport Reviews*, 41(3), 374–392. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1857886>
- Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2010). Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. *Computers and Operations Research*, 37(12), 2041–2061. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.03.015>
- Ibarra-Rojas, O. J., Giesen, R., & Rios-Solis, Y. A. (2014). An integrated approach for timetabling and vehicle scheduling problems to analyze the trade-off between level of service and operating costs of transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.08.010>
- Jain, S., Ronald, N., Thompson, R., & Winter, S. (2017). Predicting susceptibility to use demand responsive transport using demographic and trip characteristics of the population. *Travel Behaviour and Society*, 6, 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2016.06.001>
- Jara-Díaz, S., Fielbaum, A., & Gschwender, A. (2017). Optimal fleet size, frequencies and vehicle capacities considering peak and off-peak periods in public transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 106(August), 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.09.005>
- Liang, S., Ma, M., He, S., & Zhang, H. (2019). The impact of bus fleet size on performance of self-equalise bus headway control method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, 172(4), 246–256. <https://doi.org/10.1680/jmuen.18.00026>
- Liu, H., Zhao, Y., Li, J., Li, Y., & Gao, X. (2022). Optimization model of transit route fleet size considering multi vehicle type. *Sustainability (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/su14010193>
- Liu, S., Huang, W., & Ma, H. (2009). An effective genetic algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(3), 434–445. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.10.003>
- Loxton, R., Lin, Q., & Teo, K. L. (2012). A stochastic fleet composition problem. *Computers and Operations Research*, 39(12), 3177–3184. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.04.004>
- Narayan, J., Cats, O., van Oort, N., & Hoogendoorn, S. P. (2021). Fleet size determination for a mixed private and pooled on-demand system with elastic demand. *Transportmetrica A: Transport Science*, 17(4), 897–920.

<https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1819910>

- Narro, A. E. (1996). Aplicación de algunos modelos matemáticos a la toma de decisiones. *Política y Cultura*, 6, 183–198. <http://www.redalyc.org/pdf/267/26700614.pdf>
- Óscar A Beltrán. (2005). Revisiones sistemáticas de la literatura. *Revista Colombiana de Gastroenterología*, 1, 60–69.
- Papanikolaou, A., & Basbas, S. (2021). Analytical models for comparing Demand Responsive Transport with bus services in low demand interurban areas. *Transportation Letters*, 13(4), 255–262. <https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1716474>
- Peñaloza, C., Mójica, A., Escobar, M., Guio, G., Ramos, L., & Rivera, N. (2019). Transporte en cifras. *Ministerio de Transporte*, 84. <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=53?>
- Quiroz-Silva, E. (2019). Programacion por objetivos para el dimensionamiento y la asignacion de una flota de camiones en una empresa minera. *Interfases*, 12, 87–112. <https://doi.org/10.26439/interfases2019.n012.4639>
- Rahimi-Vahed, A., Gabriel Crainic, T., Gendreau, M., & Rei, W. (2015). Fleet-sizing for multi-depot and periodic vehicle routing problems using a modular heuristic algorithm. *Computers and Operations Research*, 53, 9–23. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.07.004>
- Shang, H., Liu, Y., Huang, H., & Guo, R. (2019). Vehicle Scheduling Optimization considering the Passenger Waiting Cost. *Journal of Advanced Transportation*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4212631>
- Toro-González, D., Cantillo, V., & Cantillo-García, V. (2020). Factors influencing demand for public transport in Colombia. *Research in Transportation Business and Management*, 36(September 2019), 100514. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100514>
- Vidal Holguín, C. J. (2017). *Fundamentos de control y gestión de inventarios*. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/10316>
- Vis, I. F. A., de Koster, R. B. M., & Savelsbergh, M. W. P. (2005). Minimum vehicle fleet size under time-window constraints at a container terminal. *Transportation Science*, 39(2), 249–260. <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0063>
- Wernecké Fumagalli, L. A., Alcides Rezende, D., & André Guimarares, T. (2021). *Challenges for public transportation: Consequences and possible alternatives for the Covid-19 pandemic through strategic digital city application*.
- Zografos, K. G., Androutsopoulos, K. N., & Sihvola, T. (2008). A methodological approach for developing and assessing business models for flexible transport systems. *Transportation*, 35(6), 777–795. <https://doi.org/10.1007/s11116-008-9176-6>