Capítulo 4

5 Simulaciones de movilidad urbana

Manuel Hernández Rosales
Coordinador

Oscar Missael Quintana Quilantan
Pablo Álvarez López
Idalia Flores De la Mota
Carmen Angelina García Cerrud
Pablo Uriel Benítez Ramírez
Ana Carolina Olivera
Autores

COORDINACIÓN DE HUMANIDADES
80 AÑOS 2025
CONSEJO TÉCNICO DE HUMANIDADES
PUEC UNAM

Catalogación en la publicación UNAM. Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información

Nombres: Hernández Rosales, Manuel, editor.

Título: 5 simulaciones de movilidad urbana /Manuel Hernández Rosales, coordinador.

Otros títulos: Cinco simulaciones de movilidad urbana.

Descripción: Primera edición. | Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México, Coordinación de Humanidades, Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, 2025.

Identificadores: LIBRUNAM 2278760 (libro electrónico) | ISBN 9786075878669 (libro electrónico).

Temas: Ingeniería vial -- Métodos de simulación. | Transporte -- Simulación por computadora. | Movilidad residencial -- Simulación por computadora. | Movilidad residencial -- Métodos de simulación. | Gases de escape -- Métodos de simulación. | SUMO (Programa para computadora).

Clasificación: LCC HE336.A8 (libro electrónico) | DDC 388.312—dc23

---

5 Simulaciones de movilidad urbana
Coordinador: Manuel Hernández Rosales

Primera edición: 22 de septiembre de 2025
ISBN PDF: 978-607-587-866-9

Obra completa
DOI: https://doi.org/10.22201/puec.9786075878669e.2025

Capítulo 4. 3ª Simulación: transporte público de autobuses, espaciamiento de paradas, emisiones y ganancias
DOI: https://doi.org/10.22201/puec.9786075878669e.2025.c4

D.R.© 2025 Universidad Nacional Autónoma de México
www.unam.mx

Coordinación de Humanidades
Circuito Mario de la Cueva s/n, Ciudad Universitaria,
Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México
www.humanidades.unam.mx

Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad
República de Cuba 79, Centro Histórico,
Alcaldía Cuauhtémoc, C.P. 06010, Ciudad de México
www.puec.unam.mx

Departamento de publicaciones PUEC-UNAM: Graciela Chávez Olvera
Corrección de estilo: Adriana Cataño
Diseño editorial y portada: Laura Elena Mier Hughes
Apoyo editorial: Luis Armando Acosta Uribe

El contenido de esta obra es responsabilidad de los autores. Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio, incluidos los electrónicos, sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales. Esta edición y sus características son propiedad de la UNAM.

Hecho en México / Made in Mexico

Capítulo 4

3ª Simulación: transporte público de autobuses, espaciamiento de paradas, emisiones y ganancias

Idalia Flores De la Mota*
Carmen Angelina García Cerrud**

Introducción

En los últimos años la eficiencia energética ha adquirido una mayor relevancia en la agenda pública debido al incremento en los costos de los combustibles fósiles, la creciente preocupación por el cambio climático y los desafíos en el suministro de energía. Estos factores han generado una urgencia por optimizar el uso de la energía y promover prácticas más sostenibles en todos los sectores.

La situación actual de México en materia energética y ambiental ofrece una valiosa oportunidad en el sector del transporte, debido a que el principal agente causante del impacto ambiental del transporte es el consumo de combustible, puesto que el modelo energético actual se encuentra basado en derivados del petróleo (gasolina, gasóleo), que son recursos naturales limitados. De igual forma, el sector del transporte experimentó un crecimiento anual de 2.45% durante

* Facultad de Ingeniería-UNAM
** Facultad de Ingeniería-UNAM

el periodo 1990-2015, y solo en el año 2015 se emitieron 171.3 millones de toneladas de CO_2 , que representan 24.5% de las emisiones totales (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2018). Este consumo es el principal origen de las emisiones a la atmósfera producidas por el sector, con efectos negativos sobre el medio ambiente. Por todo ello, conocer el consumo de combustible y de energía del transporte es de suma importancia para clasificar este tipo de consumos por ámbitos y realizar un buen análisis que favorezca la toma de decisiones en sentido del ahorro energético (Conserjería del Medio Ambiente, 2005).

En México, el transporte tiene un papel clave en el uso eficiente de la energía al ser la actividad con mayor potencial de ahorro energético, tanto a corto como a largo plazo; cualquier mejora en el uso de la energía brinda una enorme oportunidad para reducir el impacto ambiental (Rafael-Morales y Cervantes-de Gortar, 2002). El consumo energético del sector transporte corresponde en 67% al transporte de pasajeros, y en su mayoría al transporte urbano, lo cual sustenta la importancia de promover el uso del transporte público de pasajeros (Secretaría de Energía, 2011).

El desarrollo inadecuado del sistema de transporte masivo ha llevado a un aumento en el uso de vehículos de baja capacidad, los cuales aumentan la congestión vehicular y las emisiones, debido a que el servicio de transporte público se presta a través de diferentes modos que no se articulan entre sí, y no se cuenta con una visión del transporte público que tienda a integrar los modos de transporte existentes a través de esquemas institucionales, de

infraestructura, de tecnología, de servicios y de modelos tarifarios que garanticen cobertura y calidad en su operación. Además, el transporte público es insuficiente para las necesidades de movilidad de la población, ya que existe sobresaturación de instalaciones en ciertos horarios, falta de control operativo y mantenimiento, y a que solamente 28% de su población puede acceder al transporte masivo en un radio de 500 metros (Ciudadanos con visión, 2019; Sheinbaum Pardo, 1995; Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2018).

Sin embargo, existe una gran cantidad de mejoras al transporte público para la reducción del consumo energético. No obstante, debido a la gran diferencia en las características del transporte público de pasajeros en los países en desarrollo y los desarrollados, su aplicación en el contexto de los países en desarrollo resulta compleja puesto que se ignoran sus particularidades. Para lograr el impacto deseado, es necesario conocer las características propias del transporte público de pasajeros en países en desarrollo y los factores que lo afectan.

Este estudio se enfoca en la simulación del sistema de transporte público de autobuses, con el objetivo de analizar y proponer estrategias para reducir el consumo energético y las emisiones. A través de modelos de simulación que contemplan diferentes configuraciones de paradas, este trabajo evalúa si es posible lograr una mayor eficiencia energética en el transporte urbano mediante medidas de bajo costo, como el establecimiento de paradas fijas y la optimización de las rutas de autobuses.

Planteamiento del problema

El consumo energético en el sector de transporte representa uno de los principales desafíos ambientales y económicos para México. Con el uso predominante de combustibles fósiles, el transporte urbano de pasajeros se convierte en una fuente significativa de emisiones de CO_2, lo cual agrava los problemas de calidad del aire en las ciudades y contribuye al cambio climático global. Optimizar el consumo de energía en el transporte público es, por tanto, una necesidad urgente.

En países en desarrollo, el transporte público enfrenta retos particulares que complican su eficiencia energética. Factores como la falta de integración entre diferentes modos de transporte, el crecimiento desordenado de la demanda y la insuficiencia en la cobertura de rutas contribuyen al uso excesivo de vehículos de baja capacidad, lo que aumenta la congestión y las emisiones. Esta distinción es fundamental debido a la interacción de varios factores que influyen en el consumo de energía, como la eficiencia del combustible, la dinámica del transporte (tráfico y geografía) y las especificaciones de los vehículos (modelo y dimensiones). Además, es esencial considerar la determinación de paradas que se ajusten a la demanda de las rutas de transporte y que minimicen el consumo energético.

Para abordar estos desafíos, este estudio simula dos escenarios en el transporte público: uno donde los autobuses realizan paradas sin un orden fijo (modelo 1), y otro

con paradas establecidas y espaciadas uniformemente (modelo 2). Al comparar los modelos es posible evaluar el impacto de una mejor organización de las paradas en la reducción del consumo de combustible y la eficiencia operativa de los autobuses.

En resumen, es esencial abordar las características específicas del transporte público en países en desarrollo, considerando la optimización de las paradas y otras variables operativas para mejorar la eficiencia energética con soluciones económicas y viables.

Elementos de la simulación

En la simulación se usarán los siguientes elementos:

1. Estaciones de autobús (*BusStops*): lugares en los que el autobús hará la parada para que los pasajeros suban y bajen. El espaciamiento de estas paradas influye en la eficiencia energética, ya que menos paradas reducen el tiempo en ralentí y el consumo en cada aceleración y desaceleración.
2. Rutas (*Routes*): en la ruta se definen los edges y las paradas que tiene que recorrer el autobús durante la ruta. Será una ruta cerrada, y con repetición. Al ser una ruta cerrada, los autobuses siguen un circuito continuo. Una buena planificación de la ruta contribuye a la reducción de consumo energético al minimizar el tiempo de recorrido y la cantidad de paradas.

3. Tipo de vehículo (*vType*): se definen todos los atributos que tendrá el autobús (tamaño, peso, capacidad, etcétera). Modelar el tipo de vehículo permite calcular con precisión el consumo de combustible en diferentes condiciones de carga y tráfico.
4. Vehículo (*vehicle*): el autobús en sí mismo, que tendrá como parámetros el *vType* y la ruta.
5. Pasajeros: número de pasajeros que saldrán del área para abordar el autobús, el cual se define con una distribución de Poisson. La carga de pasajeros afecta directamente el peso del autobús y, por tanto, su eficiencia energética.
6. Tráfico: se generan vehículos de manera aleatoria con la herramienta *randomTrips*, y con la información proporcionada por la Encuesta Origen-Destino 2017 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017). Esto permite simular la congestión vial y su impacto en el consumo de energía del autobús, ya que el tráfico influye en la velocidad promedio y en el número de frenadas y aceleraciones.
7. Consumo energético: se estima el consumo energético de la ruta mediante un *script* de *Python*. Estos resultados permiten evaluar la eficiencia energética del sistema de transporte público en los dos escenarios modelados.
8. Generación de emisiones: se estiman las emisiones de la ruta mediante un *script* de *Python*. Estos resultados permiten evaluar la generación de emisiones del sistema de transporte público en los dos escenarios modelados.

Preparación del escenario

Para desarrollar los modelos, es fundamental obtener el escenario utilizando *OpenStreetMap*, que servirá como base para realizar las modificaciones necesarias a la red generada e incluir la ruta, las paradas, el tráfico y la demanda. Esto permitirá estudiar el consumo energético y las emisiones asociadas a la ruta de autobuses.

Se utiliza *OpenStreetMap* para adaptar la infraestructura vial a las necesidades del estudio, asegurando que la ruta del autobús y las paradas estén correctamente representadas. También se incorporan datos de tráfico y demanda para simular condiciones realistas.

Este enfoque permite evaluar de manera precisa cómo las características del entorno influyen en el consumo de energía y las emisiones del transporte público, lo cual es crucial para identificar oportunidades de mejora y desarrollar estrategias efectivas de eficiencia energética en el sector del transporte.

Paso 1. Modelo conceptual de simulación

Para generar una simulación, primero es necesario abstraer el sistema del mundo real para comprender su funcionamiento y características. Esto permite crear un modelo que represente la realidad de la manera más aproximada posible. En esta simulación, se genera un modelo conceptual de consumo energético:

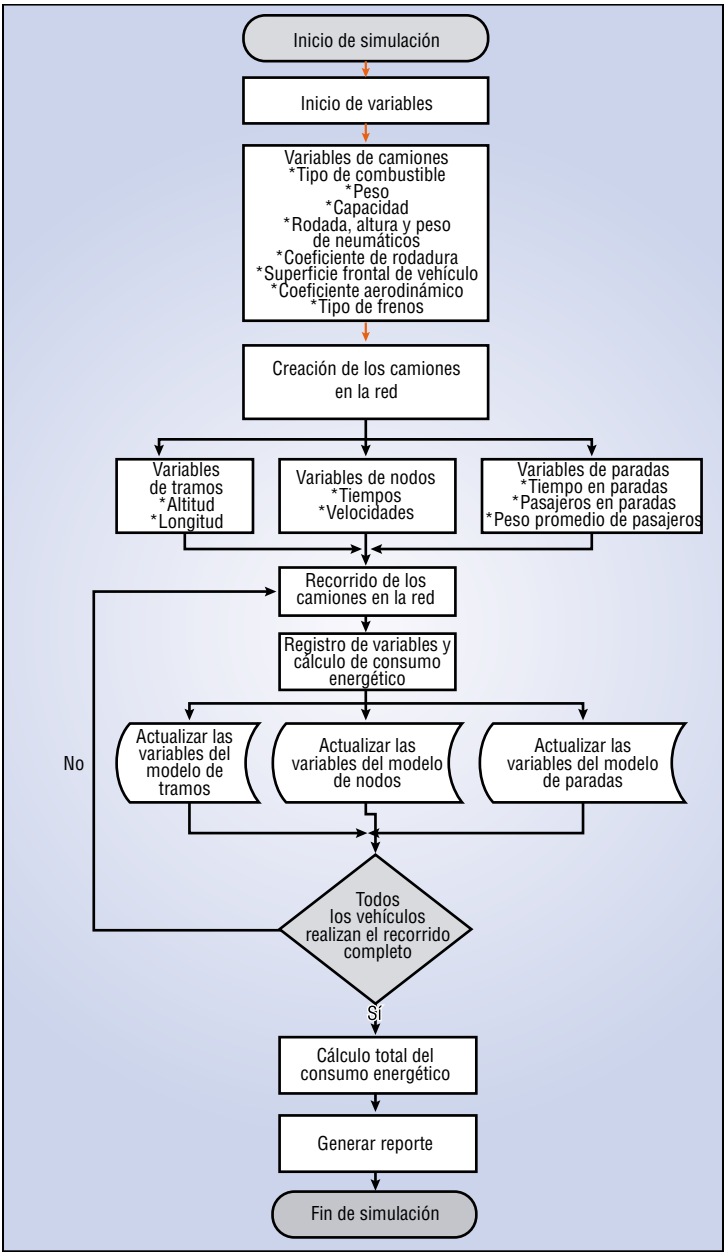
1. Modelo conceptual de consumo energético: el enfoque se centra en el consumo de energía dentro del sistema simulado. Se introducen variables de consumo energético para los autobuses y se actualizan las variables de arcos, nodos y paradas que impactan en el consumo energético en cada paso temporal de la simulación (figura 1).

Este modelo permite realizar análisis y optimizaciones detalladas, y proporciona una visión profunda del consumo energético y sus implicaciones en el sistema de transporte simulado.

Paso 2. Obtención del escenario base

Se debe localizar y encuadrar el área a simular en *Open Street Map* y se exporta en formato de *OSM XML* (figura 2), posteriormente se convierte a un formato legible por SUMO mediante la herramienta *netconvert*, la cual importa la red de carreteras guardada en *"XXXX.osm.xml"* y almacena la red SUMO-generada a partir de estos datos en *"XXX.net.xml"* (figura 3).

Figura 1. Modelo conceptual de consumo energético



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Mapa de *Open Street Maps* para la generación del escenario

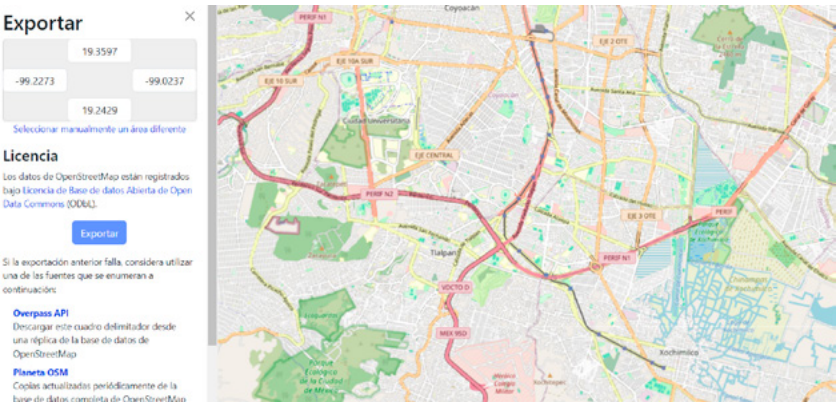


Figura 3: Red generada mediante *netconvert*

Paso 3. Edición de la infraestructura

Dado que la red se genera a través de *OpenStreetMap* (OSM), es fundamental revisar y editar la red utilizando

netedit para ajustar conexiones, agregar carriles y realizar otras modificaciones necesarias. Para iniciar este proceso, se selecciona la opción de edición y luego se abre el archivo en *netedit* (figura 4). *Netedit* permite visualizar la red de transporte de manera detallada y realizar los ajustes necesarios para reflejar con precisión las características del entorno, como conexiones entre calles, la adición de carriles específicos para autobuses u otras modificaciones que sean pertinentes para el estudio.

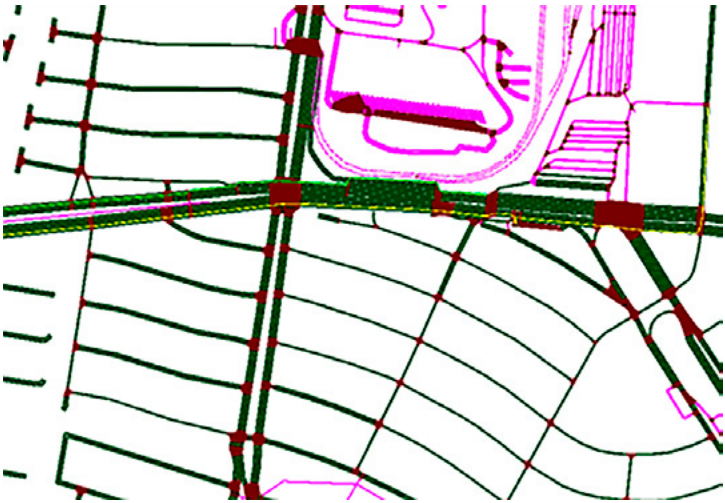
Figura 4. Edición de la red mediante *netedit*

Paso 4. Creación de la línea de autobús

Para establecer la línea de autobús es necesario acceder al modo de demanda. En este modo, se comienza seleccionando las calles que formarán la ruta del autobús (figura 5). Posteriormente, se configura el tipo de vehículo especificando los parámetros como capacidad, longitud, velocidad y pericia del conductor. Finalmente, se elige la

opción de flujo sobre la ruta y se definen los parámetros correspondientes.

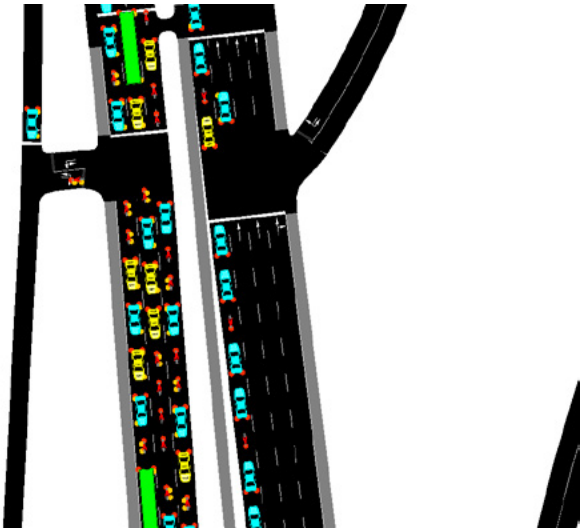
Figura 5. Generación de la ruta en la red



Paso 5. Generación de tráfico de otros modos de transporte sobre la red

Para generar otros medios de transporte en la red se emplea la herramienta *randomTrips* de *Python* para SUMO. Usando el símbolo del sistema, se introducen vehículos adicionales (como autos privados, motocicletas y taxis) de forma aleatoria en la red mediante el comando *´python randomTrips.py -n red1.net.xml -r motorcycle2.rou.xml –vehicle-class motorcycle –vtype-output motorcycle -e 2187´* para cada uno de los tipos de vehículos mencionados (figura 6).

Figura 6. Generación del tráfico en la red



Paso 6. Generación de variables en la simulación

Se genera un *script* en *Python* que define los parámetros del sistema, las rutas de autobuses, la generación e integración de peatones, la creación de vehículos, las paradas en la red y las distribuciones utilizadas para la creación de estos.

Los pasos del *script* se detallan a continuación:

1. Inclusión de librerías: el *script* comienza importando las librerías necesarias para la funcionalidad de SUMO.
2. Declaración de parámetros del sistema: se definen parámetros esenciales del sistema, como la longitud de los arcos, el número y dimensiones de las estaciones por arco, y el número de habitantes a transportar.

Estas variables pueden ajustarse dinámicamente por el usuario a través del *script*.

3. Definición de rutas de autobús: se especifican las rutas de autobús y se les asignan sus respectivos identificadores, como las líneas 0b y 1b.
4. Configuración de la distribución de probabilidades: el *script* configura las distribuciones factoriales y de *Poisson*. En particular, la distribución de *Poisson* incluye una cláusula *if* que fija los valores en 0 si son inferiores a 12. Esta distribución se utiliza para calcular las llegadas y salidas de peatones en las paradas.
5. Inicialización de la simulación: el *script* especifica el inicio de la simulación, comenzando en el paso de tiempo 0. También crea un archivo CSV para registrar los resultados de la simulación, incluyendo el tiempo, las velocidades inicial y final, y los datos de embarque de pasajeros en los autobuses.
6. Integración de peatones: los peatones se introducen en la simulación evaluando cada curva para determinar si se permite el tráfico peatonal. Se genera una lista de arcos que permiten el tráfico peatonal.
7. Generación de peatones: los peatones se generan a intervalos de cinco minutos, un periodo configurable por el usuario. Si el intervalo es exacto (siendo *st* 0), el *script* calcula la distribución de *Poisson* para determinar la proporción de peatones a generar durante ese periodo. Si el número de peatones que salen en esos cinco minutos es inferior al valor predicho por la distribución, los peatones se generarán aleatoriamente y

se colocarán en lugares fortuitos dentro de los arcos permitidos.

8. Movimiento de los peatones: una vez creados, los peatones se dirigen a paradas aleatorias (modificables a las paradas más cercanas). Si la parada deseada está en la línea 0b, los peatones suben al autobús; en caso contrario, suben a la otra línea. Todos los peatones descienden del autobús en la terminal, con la opción de modificar las estaciones mediante distribuciones.
9. Función de creación de estaciones: se define una función para crear estaciones en cada arco. Esta función obtiene la longitud del arco, resta la longitud de la estación y divide el resultado por el número de estaciones a crear en los arcos. Luego, se crea un archivo adicional con la extensión .add.xml para declarar las paradas, utilizando un archivo de texto de plantilla que contiene las paradas sin ID y los carriles por los que discurren las líneas. Un bucle emplea esta plantilla para generar las paradas. El punto de inicio de la primera parada se determina como la longitud de la parada menos un margen antes del final del bloque, ya que las paradas no se colocan en las esquinas. Al considerar el final de la parada precedente como el inicio de la siguiente, se crean las paradas subsecuentes y se genera el archivo adicional.
10. Archivo de rutas y definiciones de vehículos: el *script* especifica varios parámetros, incluyendo capacidades de autobuses, flujos de autobuses en ambas direcciones, tipos de vehículos (autobuses),

duraciones de paradas de autobús, rutas de camiones y flujos tanto de camiones como de vehículos en general. Esta información se utiliza para crear el archivo de ruta (.rou.xml).

Paso 7. Ejecución de la simulación

La simulación se ejecuta en SUMO, y los resultados, como el consumo energético, las emisiones y los tiempos de recorrido, se registran en un archivo CSV. Esto permite evaluar la eficiencia energética de cada escenario y comparar los resultados entre el modelo con paradas libres y el modelo con paradas fijas.

Paso 8. Cálculo de consumo energético

Con los resultados en CSV generados por la ejecución de la simulación, se calcula el consumo energético utilizando velocidades instantáneas y diversas variables críticas mediante un modelo desarrollado en *Python*. Estas variables incluyen propiedades como el radio y la altura de la llanta, así como el peso de la llanta y del vehículo. Además, se consideran parámetros como la velocidad inicial y final, el número de neumáticos, la fuerza gravitatoria, la masa del vehículo, la distancia recorrida y diversos valores trigonométricos como el seno y el arco tangente para determinar la energía necesaria para las pendientes.

El modelo también integra elementos como la pendiente de la carretera, el coeficiente de rodadura, la densidad del aire, el área frontal del vehículo y el coeficiente de resistencia. A partir de estos datos, el *script* determina la energía cinética, la energía de rotación, la energía necesaria para superar las pendientes, la energía de rodadura y la energía requerida para vencer la resistencia aerodinámica.

Paso 9. Cálculo de emisiones generadas

Para la determinación de las emisiones generadas, se ha desarrollado un modelo en *Python*, que utiliza el consumo energético como entrada principal. Este *script* calcula las emisiones de gases de efecto invernadero y emisiones específicas.

El proceso de estimación de energía se ha diseñado siguiendo los siguientes pasos:

1. Entrada de datos: se introducen los datos de consumo energético y la potencia del motor.
2. Cálculo de litros de GLP: se realiza el cálculo para determinar el volumen de combustible en litros de gas licuado de petróleo (GLP) requerido.
3. Definición de factores de emisión: se establecen los factores de emisión específicos para cada uno de los contaminantes relevantes.

4. Cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero: se lleva a cabo el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O).
5. Cálculo de emisiones específicas: se realiza el cálculo de las emisiones específicas de óxido nitroso (N_2O), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) según los datos y factores definidos anteriormente.

Los pasos antes mencionados, se aplican a un caso de estudio, el cual se detalla a continuación.

Caso de estudio: Ruta 36 "Lic. Adolfo López Mateos"

La Ruta 36 "Lic. Adolfo López Mateos A.C." es una asociación civil que ofrece servicios de transporte colectivo urbano y suburbano en autobuses de ruta fija. Fue fundada el 13 de julio de 1975 en respuesta al rápido crecimiento demográfico en la zona de Xochimilco y los cambios en el uso del suelo, con el objetivo principal de facilitar el acceso al transporte hacia las áreas de trabajo.

Esta ruta opera con dos ramales y tiene un horario de servicio que va desde las 5:20 hasta las 20:00 horas todos los días de la semana. Cuenta con una flota de 342 unidades. Los ramales de la Ruta 36 cubren diferentes vialidades, destaca el Ramal 01 por su sub-base en el cruce de la Glorieta de Vaqueritos y por recorrer una distancia de 8 kilómetros desde su origen hasta la primera parada.

La ruta transita por el Canal de Miramontes, que cuenta con tres carriles en cada dirección y tiene

intersecciones con varias calzadas, avenidas y calles principales, incluyendo:

1. Calzadas: Taxqueña, de la Virgen, Heroica Escuela Naval Militar, de las Bombas, del Hueso, las Brujas, Acoxpa.
2. Avenidas: del Parque, Santa Ana, San Lorenzo, División del Norte.
3. Calles con mayor flujo: Álvaro Gálvez y Fuentes, Erasmo Castellanos Quinto, Xotepingo.

Esta infraestructura vial permite que la ruta conecte con puntos clave y áreas de alta demanda en la ciudad. Los usuarios utilizan la Ruta 36 para desplazarse hacia sus lugares de trabajo y para retornar a sus hogares. La vialidad por la que transita la ruta es popular entre aquellos que necesitan transferirse a otras rutas de transporte debido a sus numerosos entronques.

Además, esta zona cuenta con una concentración importante de escuelas en sus áreas periféricas, por lo cual hay viajes relacionados con la educación. El hecho de que la ruta inicie en un centro de transferencia modal indica una diversidad amplia de usuarios. Los motivos para utilizar esta ruta incluyen la transferencia a otras rutas, el acceso a áreas escolares y los viajes recreativos, lo que atrae a usuarios de diferentes grupos de edad y necesidades.

Los datos de la operación de la ruta se obtuvieron mediante su muestreo y se recabó información respecto a las paradas, el tipo de carril y la configuración vial por donde transcurre la ruta de transporte público de

pasajeros; las terminales de la ruta, incluidas las frecuencias de llegada tanto de vehículos como de pasajeros y de los recorridos realizados por la ruta, como las coordenadas GPS, el tipo de paradas y la demanda de pasajeros asociada a estas; el tamaño total de la flota y los vehículos que prestan servicio en ella diariamente; características técnicas de los vehículos; mantenimientos realizados y los costos asociados a estos, y el consumo de combustible de la flota de vehículos, así como el costo promedio de este recurso.

Simulación con datos reales

Para simular el estado actual de la ruta es fundamental obtener datos específicos de los viajes que tienen lugar en la zona de estudio. Estos datos provienen de la Encuesta Origen-Destino, la cual ofrece información detallada sobre los desplazamientos según el modo y tipo de transporte en áreas geográficas básicas (AGEB) o alcaldías por donde opera la ruta (44 Coapa, 45 Culhuacán CTM, 46 Campestre Churubusco y 69 La Noria). Estos datos son esenciales para modelar el tráfico en los arcos y nodos de la simulación, así como para estimar la demanda esperada de los microbuses que integran la ruta. A continuación, se describen los tipos de viajes y los modos de transporte relevantes extraídos de la Encuesta Origen-Destino (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017):

1. Viajes en transporte privado: desplazamientos realizados en vehículos particulares como automóviles y motocicletas.
2. Viajes en transporte público: incluye desplazamientos en sistemas de transporte público como microbuses, taxis, Metrobús, autobuses y mototaxis.
3. Viajes en bicicleta: desplazamientos realizados en bicicleta.
4. Viajes peatonales: desplazamientos a pie.
5. Motos circulando: cantidad de motocicletas en circulación.
6. Autos circulando: número de automóviles en circulación, considerando un promedio de 1.5 usuarios por auto.
7. Microbuses circulando: microbuses en operación, con una capacidad típica de 10 personas.
8. Taxis: cantidad de taxis en circulación, estimando un promedio de 1.5 pasajeros por taxi.

Al obtener estos datos detallados sobre los viajes según los modos de transporte y áreas geográficas específicas, junto con información sobre la densidad poblacional (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020), es posible modelar de manera precisa la demanda de servicios de transporte, incluyendo los microbuses que operan en la ruta estudiada. Esto permite realizar simulaciones más realistas y efectivas para planificar y optimizar el sistema de transporte en la zona.

Con dichos datos se procede a genera la simulación partiendo de los siguientes supuestos:

1. Se simula la hora de mayor tránsito en la vialidad y mayor demanda
2. Se toman los valores para el tráfico de la Encuesta Origen-Destino 2017:

Datos de tráfico, demanda y paradas por hora	Valor
Viajes peatonales	7,687
Motos circulando	965
Autos circulando (considerando 1.5 usuarios promedio)	11,428
Microbuses circulando (10 personas)	2,741
Taxis (considerando promedio 1.5)	2,835
Autobuses propios de la ruta	35
Demanda de la ruta	4,235 usuarios
Duración de paradas en terminales	240 segundos
Duración de paradas en ruta	60 segundos

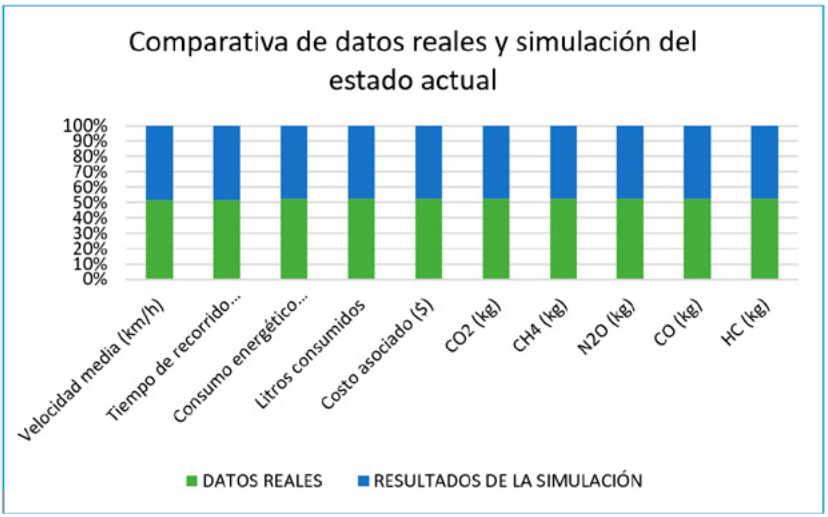
Para validar y verificar la simulación, se llevaron a cabo 100 corridas de un mes de duración, punto en el que se alcanza el equilibrio del sistema y se comparan los datos simulados con los datos reales obtenidos mediante muestreo (tabla 2, figura 7). Dado que la diferencia porcentual entre la simulación del estado actual y los datos reales oscila entre 5 y 10 por ciento, se puede concluir que la simulación generada es válida.

Ya que la simulación ha sido verificada es posible generar la simulación con la medida de mejora propuesta, ya que esto garantiza que los resultados generados serán válidos y apoyarán a la toma de decisiones.

Tabla 2. Comparativa de valores de datos reales y simulación del estado actual

Factor	Datos reales	Resultados de la simulación	Diferencia porcentual
Velocidad media (km/h)	15.1145	14.358775	5
Tiempo de recorrido promedio (min)	26.424	25.1028	5
Consumo energético (Joules)	6,941,067,891.39	6,246,961,102.25	10
Litros consumidos	278.81	250.929	10
Costo asociado ($)	3,321.76	2,989.580055	10
CO2 (kg)	437.77	393.993	10
CH4 (kg)	0.02082	0.018738	10
N2O (kg)	0.000694	0.0006246	10
CO (kg)	1.3882	1.24938	10
HC (kg)	0.06941	0.062469	10

Figura 7. Comparativa de valores de datos reales y simulación del estado actual



Simulación con implementación de paradas establecidas

Una vez verificada y validada la simulación del estado actual de la ruta, se procede a introducir las medidas de mejora propuestas en la simulación. Para este caso de estudio, se implementa la siguiente modificación:

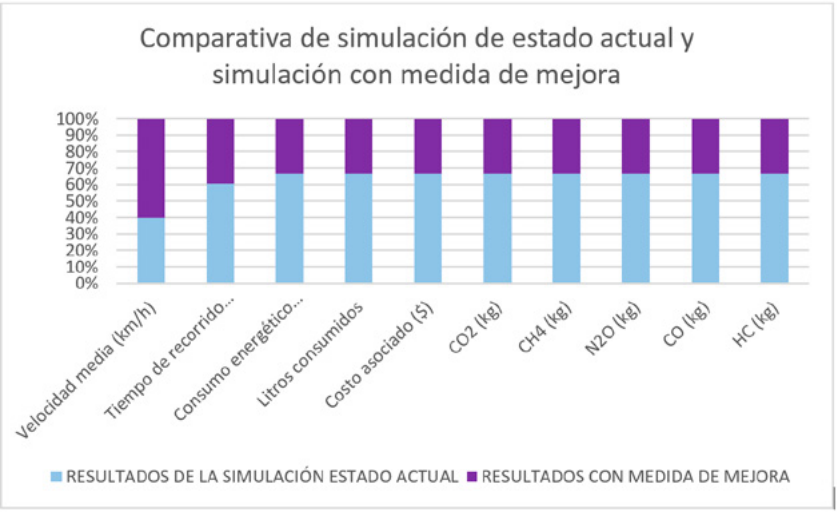
1. Asignación de paradas establecidas con distancia definida: se establecen paradas fijas a lo largo de la ruta, con una distancia predefinida entre ellas de 450 metros. Esta estrategia busca optimizar la distribución de paradas para mejorar la accesibilidad y eficiencia del servicio, reduciendo tiempos de espera innecesarios.

Posteriormente, se realizan 100 corridas de simulación para comparar el funcionamiento entre la simulación del estado actual y la simulación con la incorporación de las medidas de mejora propuestas, como se muestra en la tabla 3 y la figura 40. Durante estas corridas, se generan nuevamente los modelos de consumo energético y de emisiones para evaluar el impacto de las modificaciones implementadas en la eficiencia y sostenibilidad de la ruta. Debido a los requerimientos computacionales de la simulación, esta se realiza mediante línea de comando y no de manera gráfica.

Tabla 3. Comparativa de valores de simulación del estado actual y con mejoras propuestas

Factor	Resultados de la simulación estado actual	Resultados con medida de mejora	Diferencia porcentual
Velocidad media (km/h)	15.1145	22.67175	50
Tiempo de recorrido promedio (min)	26.424	17.1756	35
Consumo energético (Joules)	6,941,067,891.39	3,470,533,945.70	50
Litros consumidos	278,810	139,405	50
Costo asociado ($)	3,321.76	1,660.877808	50
CO2 (kg)	437.77	218.885	50
CH4 (kg)	0.02082	0.01041	50
N2O (kg)	0.000694	0.000347	50
CO (kg)	1.3882	0.6941	50
HC (kg)	0.06941	0.034705	50

Figura 8. Comparativa de simulación de estado actual y simulación con medida de mejora



Como es posible observar, la delimitación de una medida de mejora de bajo costo como la implementación de paradas establecidas —que no necesariamente requiere de gran inversión debido a que su señalización puede ser simple y sin inversión en infraestructura adicional— genera un gran impacto en el consumo energético (50%), pasando de 278,810 litros a 139,405 litros, lo cual tiene un efecto de igual forma en los costos asociados y en las emisiones.

Conclusiones

La simulación del transporte público de pasajeros es una herramienta invaluable para la toma de decisiones, siempre y cuando se realice con precisión mediante la abstracción del sistema a simular y la integración de datos que reflejen la realidad lo más fielmente posible.

Los datos de tráfico son esenciales para esta simulación y para mejorar la eficiencia del transporte público. La densidad poblacional y los datos de viajes proporcionan información crucial sobre los patrones de movilidad y las necesidades de desplazamiento. Al integrar esta información en la simulación del tráfico es posible identificar áreas de congestión y puntos de mejora en la operación de la ruta. La comparación entre los datos simulados y reales es crucial para validar la precisión del modelo y mejorar su utilidad en la toma de decisiones.

Las mejoras implementadas se evalúan en la simulación para medir su impacto en el rendimiento y la sostenibilidad del transporte público, incluyendo la eficiencia energética y la reducción de emisiones.

En el modelo sin paradas establecidas, los autobuses realizan detenciones en función de la demanda en tiempo real, lo que resulta en un patrón de frenadas y aceleraciones frecuentes. Esta variabilidad en la operación genera un consumo energético significativamente mayor y un aumento en las emisiones de CO_2 y otros contaminantes, debido a que el vehículo gasta más energía en repetidas aceleraciones y en el tiempo de ralentí en cada parada.

En contraste, el modelo con paradas fijas muestra una mejora considerable en todos los factores medidos:

1. Reducción de consumo energético: con un intervalo constante entre paradas, el autobús mantiene una velocidad promedio más estable y reduce la frecuencia de aceleraciones. Esto resulta en una disminución de hasta un 50% en el consumo de combustible, lo que se traduce en una menor dependencia de recursos energéticos y una significativa reducción en costos operativos.
2. Disminución de emisiones: las emisiones de CO_2, CH_4, y N_2 muestran reducciones proporcionales al ahorro energético, contribuyendo a una menor huella de carbono. En el modelo mejorado, las emisiones

de CO_2 disminuyen en 50%, lo cual representa una reducción sustancial en el impacto ambiental del transporte público.

3. Mejora en tiempos de recorrido: el tiempo promedio de recorrido en el modelo con paradas fijas se reduce en 35%. Esta mejora en la eficiencia del tiempo beneficia tanto a los operadores de transporte, al optimizar la rotación de vehículos, como a los usuarios, al brindarles un servicio más rápido y predecible.

La implementación de paradas establecidas no requiere una inversión significativa en infraestructura, ya que solo implica señalización básica. Esta estrategia de bajo costo tiene un impacto directo en la reducción de consumo y emisiones, lo que resulta en beneficios económicos y ambientales sustanciales sin la necesidad de modificar significativamente el sistema existente. Los ahorros en combustible y los menores costos asociados a las emisiones también aumentan la viabilidad de este tipo de acciones en otros sistemas de transporte similares.

La medida de mejora implementada en la simulación, como la delimitación de paradas establecidas, muestra una eficiencia significativa en cuanto al ahorro energético. Es importante destacar que no se requieren medidas costosas ni de largo tiempo de implementación para lograr un impacto significativo en el consumo energético y las emisiones, y mantener al mismo tiempo beneficios económicos.

Este análisis demuestra que la simple reorganización de las paradas en intervalos definidos es una medida eficaz

para optimizar la eficiencia del transporte público. Se recomienda explorar la aplicación de esta acción en otras rutas y realizar pruebas piloto para validar los resultados de la simulación en entornos reales. Además, un seguimiento continuo de la reducción en emisiones y consumo energético permitirá identificar oportunidades adicionales de mejora y adaptar la estrategia según las necesidades específicas de cada ruta.

La tabla 4 presenta una estimación del ahorro potencial al aplicar las mejoras de eficiencia en las 525 rutas de microbuses de la Ciudad de México (Moovit, 2025). Se comparan factores clave como el consumo energético, el uso de combustible, los costos operativos y las emisiones contaminantes, y se muestra la reducción total esperada al escalar los resultados de la simulación a toda la red de rutas.

Tabla 4 Estimación potencial de ahorro para la Ciudad de México

Factor	Ahorro por ruta	Total de rutas	Ahorro total estimado
Consumo energético (Joules)	3,470,533,945.70	525	1,821,530,345,492.50
Litros consumidos	139.405	525	73,186.125
Costo asociado ($)	1,660.88	525	871,961.95
CO_2 (kg)	218.885	525	114,911.625
CH_2 (kg)	0.01041	525	5.47025
N_2O (kg)	0.000347	525	0.182175
CO (kg)	0.6941	525	364.4025
HC (kg)	0.034705	525	18.208125

Al extrapolar las estimaciones es posible observar que:

1. Consumo energético (Joules): se estima una reducción de aproximadamente 1.82 billones de Joules diarios, lo que implica una menor demanda de energía en el transporte.
2. Litros consumidos: se reducirían cerca de 73,186 litros de combustible por día, con lo cual disminuyen los costos y la dependencia de combustibles fósiles.
3. Costo asociado ($): Se prevé un ahorro total diario de alrededor de 871,962 pesos, lo que representa un impacto económico positivo tanto para los operadores como para el sistema de transporte en general.
4. Emisiones contaminantes (**CO_2, CH_4, N_2O, CO, HC**): se calcula una reducción significativa en la emisión de gases de efecto invernadero y contaminantes locales, con 114,912 kg menos de CO_2 al día, además de menores emisiones de metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (N_2O), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos no quemados (HC), lo que contribuiría a mejorar la calidad del aire en la ciudad.

Estos resultados son estimaciones que asumen un ahorro uniforme en todas las rutas. Sin embargo, factores como la densidad del tráfico, la infraestructura y la implementación efectiva de las mejoras pueden influir en las cifras reales. Aun así, el análisis ofrece una base útil para considerar los beneficios ambientales y económicos de optimizar la eficiencia del transporte público en la Ciudad de México.

La simulación modela el transporte público de autobuses con el objetivo de evaluar estrategias para reducir el consumo energético y las emisiones. Se comparan dos escenarios: uno con paradas sin ubicación fija y otro con paradas establecidas a distancias regulares. La simulación, desarrollada en SUMO y basada en datos reales de tráfico y demanda, permite analizar el impacto de estas modificaciones en la eficiencia del transporte. Los resultados muestran que la implementación de paradas fijas reduce el consumo de combustible y las emisiones en 50%, además de mejorar los tiempos de recorrido y reducir costos operativos.

Bibliografía

Ciudadanos con Visión (2019). Acuerdos para la movilidad en la ZMVM (Informe técnico). Ciudad de México: Centro de Colaboración Cívica.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2018). Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México. Ciudad de México: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Conserjería del Medio Ambiente (2005). Manual para la Gestión Ambiental en el Sector Transporte en Andalucia. Andalucía: Garriguez Medio Ambiente, S.L.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2018, 10 de mayo). Inventario nacional de emisiones de

gases y compuestos de efecto invernadero. https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). Encuesta Origen Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (EOD) 2017. https://www.inegi.org.mx/ programas/eod/2017/

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/

Moovit (05 de Febrero de 2025). Moovit. Obtenido de Peseros - Horarios, rutas y paradas: https://moovitapp.com/index/es-419/transporte_p%C3%BAblico-lines-Ciudad_de_Mexico 822-1341234

Rafael-Morales, M., y Cervantes-de Gortar, J. (2002). Reduced consumption and environment pollution in Mexico by optimal technical driving of heavy motor vehicles. Energy, 27: 1131-1137.

Secretaría de Energía (2011). Indicadores de eficiencia energética en México, 1-168.

Sheinbaum Pardo, C. (1995). Transportation in the Mexico City Metropolitan Area. Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, 49-52.

Para consultar los códigos fuente de este libro:

https://github.com/PUEC-UNAM/Libro-simulaciones-sumo

5 simulaciones de movilidad urbana
es editado por el Departamento de Publicaciones
del Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad
de la Universidad Nacional Autónoma de México,
en versión electrónica, formato pdf, el 22 de septiembre
de 2025. La versión electrónica fue elaborada por Laura
Elena Mier Hughes.El cuidado de la edición electrónica
estuvo a cargo de Graciela Chávez Olvera.

Esta obra pretende mostrar al lector cómo se hacen estudios de movilidad urbana a través de la simulación con la herramienta SUMO (Simulation of Urban Mobility) de la DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) de Alemania junto con el lenguaje de programación Python para proponer cambios en la configuración vial o para sugerir la solución de problemas relacionados con la movilidad.

En este libro se encuentran aplicaciones a la reconfiguración de un Centro Histórico, al método de cargado eléctrico de autobuses, a la estimación de emisiones ante conflictos viales, a la mejor configuración de paradas de transporte de pasajeros y a cuantas emisiones se evitan por el uso de un sistema de bicicletas citadino.

COORDINACIÓN DE HUMANIDADES
80 AÑOS 2025
CONSEJO TÉCNICO DE HUMANIDADES
PUEC UNAM