

Optimización de la Gestión del Transporte Municipal mediante un Sistema Multiplataforma de Monitorización y Control Basado en Web

Cabana Gabriel, Castillo Pedro, Vega Omar, Padilla Luis
Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Ingeniería
Lima, Perú

I. **Abstract**—This article presents the application of System Dynamics to the optimization of municipal transportation, aiming to provide a holistic and comprehensive view of the complex system that underlies public transportation management. Using the Forrester modeling methodology, key variables influencing the system were identified, such as bus punctuality, route capacity, fleet management, and user demand. Relevant indicators, such as traffic flow, fleet allocation, and infrastructure quality, were considered to understand the dynamics and interactions between these variables. The study aims to assist policymakers in improving transportation strategies that enhance operational efficiency, reduce waiting times, and increase user satisfaction, ultimately contributing to better resource allocation and improved public service delivery in urban mobility systems.

II. INTRODUCCION

La transformación digital de los sistemas de gestión urbana ha permitido que modelos complejos de simulación, antes limitados a entornos de escritorio, ahora puedan ser ejecutados y consultados a través de plataformas web. En este contexto, la gestión del transporte municipal, un componente esencial de la infraestructura urbana puede beneficiarse enormemente al migrar sus herramientas de análisis y simulación a entornos accesibles en línea. Esta accesibilidad resulta clave para mejorar la toma de decisiones en tiempo real, especialmente por parte de autoridades que no siempre se encuentran en sus oficinas o centros de control.

Este artículo presenta la implementación web de un sistema de simulación desarrollado en Vensim, orientado a optimizar el transporte público municipal mediante la Dinámica de Sistemas. Utilizando tecnologías como Flask, PySD y Ngrok, el modelo ha sido integrado a una interfaz web interactiva, accesible desde cualquier dispositivo conectado a internet, sin necesidad de instalar software especializado ni recurrir a servidores de pago. Esto permite a los responsables de la gestión del transporte visualizar el comportamiento de variables clave —como la fluidez del tráfico, la satisfacción de los usuarios o la inversión en infraestructura— en tiempo real y desde cualquier ubicación.

El objetivo de esta implementación es facilitar el monitoreo continuo y descentralizado de los procesos de transporte urbano, promoviendo una gestión más ágil, transparente y basada en datos. El artículo describe la arquitectura del sistema, los requisitos funcionales y técnicos, y la forma en que se

asegura la visualización dinámica de los resultados simulados, integrando modelos complejos con tecnologías web modernas.

III. DESARROLLO DE CONTENIDOS

A. Consideraciones

El sistema de transporte municipal es un fenómeno complejo que abarca diversas actividades y condiciones operativas que influyen en el dinamismo de su gestión. Las variables que conforman este sistema, como la demanda de transporte, capacidad de rutas, puntualidad de los buses, y utilización de la flota tienen un impacto directo en el desempeño general del sistema. Al construir el modelo, es esencial limitar el uso de variables exógenas que no son determinadas por el modelo en sí, pero que pueden afectar de manera significativa las dinámicas internas, como factores externos de demanda o condiciones externas como el clima o regulaciones gubernamentales. Estas variables son consideradas como predeterminadas en el modelo, y su comportamiento no depende de las variables endógenas dentro de este sistema de optimización.

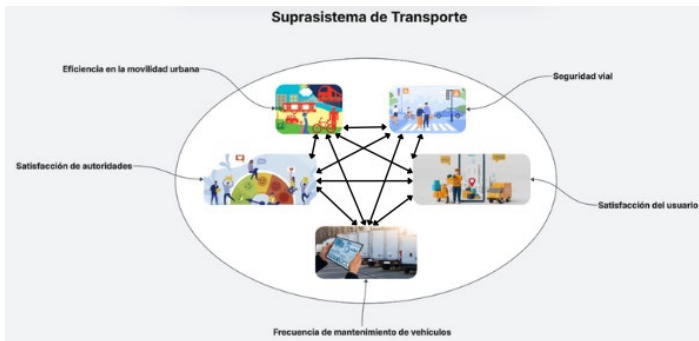
B. Declaración del Problema

El transporte municipal en las ciudades es un sistema complejo y fundamental para la economía y calidad de vida de los ciudadanos. En este contexto, planteamos el problema de cómo optimizar la gestión del transporte público municipal en función de variables clave como la demanda de usuarios, la capacidad de las rutas, la gestión de flotas y la congestión del tráfico. Este estudio se centrará en analizar cómo la asignación de recursos (buses, rutas, etc.), el análisis de tráfico en tiempo real, y las políticas públicas afectan el desempeño del sistema de transporte. Se evaluará cómo factores como la puntualidad y la satisfacción de los usuarios influyen en la eficiencia del servicio, proponiendo estrategias para reducir tiempos de espera y minimizar la congestión, todo a través de simulaciones y análisis de escenarios con el modelo de dinámica de sistemas desarrollado.

C. Metodología

1. Aplicación del TGS (Teoría General de Sistemas) al Sistema de Transporte Municipal

- Se utilizó el **TGS** para entender y modelar el sistema de transporte municipal como un **supersistema** complejo. Este enfoque permite ver cómo las **variables clave** están interrelacionadas dentro del sistema y cómo las decisiones tomadas en un área impactan las demás.
- En el **supersistema de transporte** se identificaron cinco **subsistemas principales**:
 - **Eficiencia en la movilidad urbana**
 - **Seguridad vial**
 - **Satisfacción del usuario**
 - **Satisfacción de las autoridades**
 - **Frecuencia de mantenimiento de vehículos**
- Cada uno de estos subsistemas se analizó utilizando diagramas causales, identificando las relaciones de retroalimentación entre ellos.



2. Uso de Diagramas Causales y Forrester para Modelar el Comportamiento del Sistema

- Se diseñaron **diagramas causales** (utilizando **Forrester**) para representar cómo las variables dentro de cada subsistema interactúan entre sí. Por ejemplo:
 - La **frecuencia de mantenimiento de vehículos** impacta directamente la **seguridad vial**, lo que a su vez influye en la **satisfacción del usuario** y en la **eficiencia de la movilidad urbana**.
 - El **nivel de satisfacción de las autoridades** afecta la **frecuencia de mantenimiento de vehículos**, ya que decisiones políticas influirán en los presupuestos asignados a la infraestructura y mantenimiento.
- Los **diagramas de Forrester** fueron utilizados para representar las dinámicas del sistema en términos de **flujos** y **stocks**, permitiendo simular cómo los cambios en las políticas de transporte afectarán a largo plazo las métricas clave del sistema.

3. Simulación de Escenarios y Modelos en Vensim

- El modelo desarrollado en **Vensim** permitió simular diversos escenarios para cada subsistema. Las simulaciones se centraron en cómo la **inversión en infraestructura** y la **gestión de flotas** impactan en la **congestión del tráfico**, la **satisfacción de los usuarios**, y los **accidentes viales**.
- Se probaron **políticas públicas** y estrategias de **optimización de rutas** basadas en diferentes supuestos de **demandas de usuarios** y **capacidades de las rutas**.

4. Integración de Resultados con PySD y Python

- Los resultados de las simulaciones fueron exportados a **SQL** para su procesamiento posterior.
- En **Python**, se utilizaron **librerías de visualización** para generar **gráficas** y **tablas** interactivas que permiten a los responsables de la gestión del transporte ver el impacto de las diferentes políticas y decisiones.

D. Diagrama Causal

Para construir el **diagrama causal** del subsistema de **satisfacción del usuario**, es necesario identificar las **relaciones causales** entre las variables clave. A través de la investigación, se establecen las relaciones causales entre las variables y sus efectos mutuos. Los lazos positivos indican que un aumento en una variable conduce a un crecimiento en otra, mientras que los lazos negativos indican que un aumento en una variable provoca una disminución en la otra.

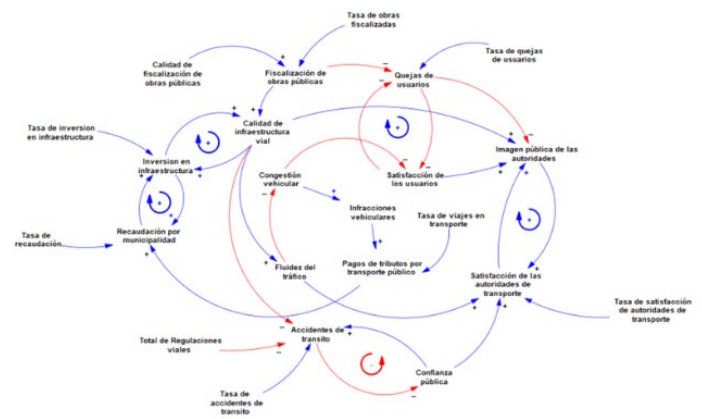


Fig. 1. Modelo Causal desarrollado en Vensim

E. Explicación del modelo Causal

El **sistema de transporte municipal** está estrechamente vinculado a variables como la **capacidad de las rutas**, la **gestión de flotas** y la **demandas de usuarios**, los cuales determinan la eficiencia operativa del sistema. Este proceso genera beneficios significativos en términos de reducción de **tiempos de espera** y aumento de la **satisfacción de los usuarios**. A medida que las **autoridades locales** incrementan las inversiones en **infraestructura vial**, destinan más recursos a **mejoras en las rutas** y **tecnologías de monitoreo**, lo que fortalece el sistema de transporte. Además, las **políticas públicas** y los ingresos generados por **tarifas de transporte** permiten financiar **proyectos de infraestructura**, los cuales, a su vez, mejoran la calidad del servicio y la experiencia de los usuarios. Finalmente, en el contexto de la **gestión del tráfico** y **seguridad vial**, la **congestión vehicular** y la **fluidez del tráfico** afectan directamente la **satisfacción de los usuarios** y la **confianza pública**, consolidando la optimización del sistema de transporte como un factor clave frente a los desafíos de la movilidad urbana.

F. Diagrama Forrester

El diagrama de Forrester es una herramienta de modelado utilizada en la dinámica de sistemas para representar visualmente las relaciones entre variables dentro de un sistema complejo, especialmente en contextos donde hay retroalimentaciones (feedback loops). Estos diagramas se emplean para mostrar cómo los cambios en una variable pueden afectar a otras variables, tanto directa como indirectamente, a lo largo del tiempo. A menudo se utilizan para simular sistemas que involucran dinámicas no lineales, como los procesos de crecimiento o declive en un sistema económico o social. Según Forrester (1961), "los diagramas de retroalimentación permiten entender cómo las interacciones dentro de un sistema causan comportamientos complejos, como los ciclos de crecimiento y declive, al mostrar las relaciones causales entre las variables". El modelo se desarrolla dinámicamente en una interacción permanente. Los

flujos de cada una de las variables y explicaciones del desarrollo de cada caso han sido interrelacionados con el programa Vensim, obteniéndose la simulación de su comportamiento para ver un antes y un después (ver Figura 2).

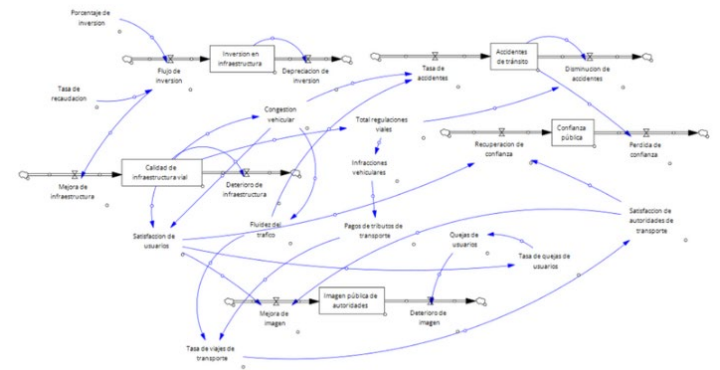


Fig. 2. Modelo Forrester desarrollado en Vensim

G. Requisitos para la implementación web

1. Requisitos Funcionales

- RF1: Visualización en web de gráficos de simulación por cada variable de nivel.
- RF2: Configuración editable desde la base de datos para título, ejes y colores de cada gráfica.
- RF3: Soporte multiplataforma (móvil, tablet, escritorio).
- RF4: Manejo visual de errores (ej. archivo no encontrado, variables mal escritas).

2. Requisitos No Funcionales

- RNF1: Interfaz responsiva sin pérdida de contenido.
- RNF2: No requiere instalación local del software Vensim por parte del usuario final.
- RNF3: Capacidad para ser accedido simultáneamente por múltiples usuarios.

H. Arquitectura del Sistema Web

1. Arquitectura de Desarrollo

Se implementó una arquitectura MVC (Modelo-Vista-Controlador) adaptada, donde el componente adicional route.py gestiona las URLs. El backend fue desarrollado en Python con Flask; la visualización de datos se realizó con Matplotlib y mplot3d, generando gráficos HTML interactivos. El entorno se ejecuta en un servidor local XAMPP, conectado a MySQL.

2. Estructura de Componentes

- app.py: inicializa la aplicación Flask y configura la conexión vía Ngrok.
- route.py: define la ruta principal del sistema (/) y controla la redirección a vistas.
- controller.py: ejecuta la lógica de simulación (descarga el modelo. mdl, ejecuta PySD, grafica con Matplotlib).
- model.py: accede a la base de datos para obtener los parámetros configurables.
- connection.py: maneja la conexión a la base de datos usando variables de entorno (.env).

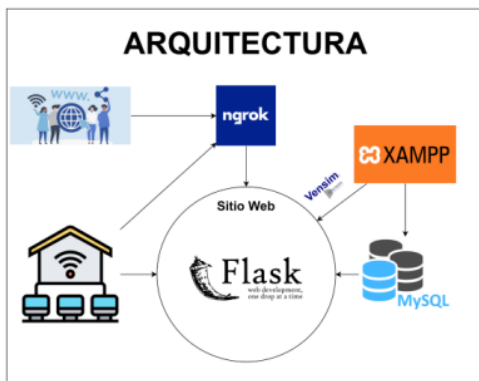


Fig3. Arquitectura del Sistema Web

2. Implementación en Flask

- Se define la lógica de control para simular cada modelo y submodelo.
- Cada variable de nivel se procesa con PySD.
- Los gráficos se personalizan y convierten a HTML interactivo para incrustarse en la plantilla template.html.

```

import ssl
from flask import Flask
from src.Routes.route import modelRoute

from pyngrok import ngrok
ssl._create_default_https_context = ssl._create_unverified_context
ngrok.set_auth_token('2hKn4UM0XykrNTC8S8Mz0IX0tY_6YwX3MKDn4w3KwTzUFFN')
app = Flask(__name__)
modelRoute(app)

if __name__ == "__main__":
    public_url = ngrok.connect(5000)
    # Obtener la URL pública generada por Ngrok
    public_url_str = str(public_url)
    print('URL pública de Ngrok:', public_url_str)
    app.run()
  
```

Fig5. Entorno Python (implementación en Flask)

I. Desarrollo del Sistema

1. Preparación del Entorno Local

- Instalación de XAMPP y activación de servicios Apache y MySQL.
- Creación de carpeta assets/vensim2 dentro del directorio htdocs.
- Importación de la base de datos vensimwebGp2.sql.
- Instalación de bibliotecas necesarias: flask, pysd, mpld3, mysql-connector-python, python-decouple, pyngrok, urllib3, entre otras.



Fig4. Entorno local XAMPP

3. Publicación Web con Ngrok

- Ngrok permite exponer el entorno local de Flask como una URL pública temporal.
- La herramienta se ejecuta en paralelo al servidor Flask y genera una dirección accesible desde cualquier navegador.
- De este modo, el sistema es visible en todo el mundo sin necesidad de hosting externo.

```

app.py - C:\Users\User\Downloads\APC\project\app.py (3.9.4)
File Edit Format Run Options Window Help

import ssl
from flask import Flask
from src.Routes.route import modelRoute

from pyngrok import ngrok
ssl._create_default_https_context = ssl._create_unverified_context
ngrok.set_auth_token('2hKn4UM0XykrNTC8S8Mz0IX0tY_6YwX3MKDn4w3KwTzUFFN')
app = Flask(__name__)
modelRoute(app)

if __name__ == "__main__":
    public_url = ngrok.connect(5000)
    # Obtener la URL pública generada por Ngrok
    public_url_str = str(public_url)
    print('URL pública de Ngrok:', public_url_str)
    app.run()

...
if __name__ == "__main__":
    app.run('0.0.0.0', port=5000)
...
  
```

Fig6. Publicación web con Ngrok

IV. CONCLUSIONES

La implementación web de un sistema de simulación dinámica para el transporte municipal ha demostrado ser una estrategia efectiva para facilitar la toma de decisiones basada en datos. Esta solución no solo permite ejecutar modelos complejos desde una interfaz accesible, sino que además brinda la posibilidad de monitorear en tiempo real el comportamiento del sistema desde distintos dispositivos, eliminando la necesidad de software especializado o infraestructura costosa.

El uso combinado de herramientas como Vensim, PySD y Flask, junto con la publicación del sistema mediante Ngrok, ha permitido trasladar los beneficios del modelado dinámico a un entorno completamente accesible por autoridades, operadores y gestores urbanos. Este enfoque ha sido clave para visibilizar la interacción entre variables como la fluidez del tráfico, la inversión en infraestructura, la satisfacción de los usuarios y la gestión de la flota.

A futuro, resulta indispensable ampliar la funcionalidad del sistema web, integrando nuevas características como dashboards personalizables, sistemas de alertas, autenticación de usuarios y conexión con datos en tiempo real provenientes de sensores urbanos o APIs de transporte. Asimismo, este modelo puede ser replicado en otras áreas de servicios públicos, como salud, agua o energía, donde también se requiere comprender y optimizar sistemas complejos mediante simulación dinámica.

V. RECOMENDACIONES

Para fortalecer y escalar la plataforma web de simulación del transporte municipal, se proponen las siguientes líneas de acción:

- **Extender la inversión en infraestructura digital:** Incorporar servidores o servicios cloud escalables (como AWS o Azure) para garantizar disponibilidad continua del sistema y permitir mayor concurrencia de usuarios.
- **Optimizar la experiencia de usuario:** Implementar filtros dinámicos, selección por rangos de tiempo y mejoras en la visualización para facilitar el análisis por parte de autoridades.
- **Integrar datos en tiempo real:** Conectar la plataforma con sensores de tráfico, GPS de flotas o APIs de transporte urbano para actualizar las simulaciones con información en vivo.
- **Desarrollar modelos predictivos en la web:** Incorporar algoritmos que permitan anticipar escenarios de

J. Resultados: Acceso Web y Visualización Interactiva

La plataforma permite a los usuarios acceder a los resultados desde cualquier dispositivo. Las gráficas se actualizan automáticamente tras cada simulación, y presentan comparaciones dinámicas entre variables como accidentes viales, satisfacción ciudadana o calidad de la infraestructura. La interfaz es completamente responsiva y funcional tanto en escritorio como en móviles.

Se han validado múltiples sesiones simultáneas de acceso, y se ha comprobado que las autoridades pueden tomar decisiones en tiempo real al observar tendencias y patrones generados por el sistema.

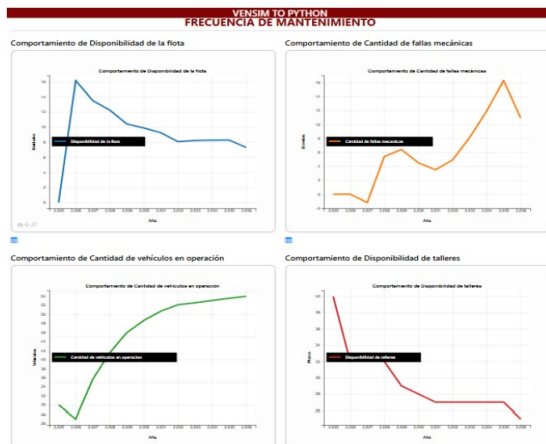


Fig7. Visualización de gráficas



Fig8. Visualización de tablas

congestión o fallas en el sistema, y sugerir ajustes automáticos en rutas y frecuencias.

- **Promover la interoperabilidad institucional:** Permitir que distintos departamentos municipales accedan a la plataforma y compartan información estratégica para una gestión urbana coordinada.

Estas acciones garantizarán que la solución tecnológica evolucione hacia una herramienta robusta de **planificación urbana inteligente**, basada en simulación, evidencia y accesibilidad universal.

VI. REFERENCES

- Forrester, J. W. (1961). Industrial Dynamics. MIT Press.
- Sterman, J. D. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill.
- Meadows, D. H. (2008). Thinking in Systems: A Primer. Chelsea Green Publishing.
- Vuchic, V. R. (2007). Urban Transit: Operations, Planning, and Economics. Wiley.
- Ceder, A. (2007). Public Transportation Systems: Principles of System Design, Operations Planning, and Real-Time Control. McGraw-Hill.
- Litman, T. (2020). Transportation and Land Use Innovations: Preparing for the New Era of Transport. Victoria Transport Policy Institute.