



CUCEI

Optimización de Rutas de Transporte Público Troncales en Guadalajara

Rafael Aldo Hernández Luna

Reporte de Proyecto - Sistemas Inteligentes

26 de noviembre de 2025

Índice

1. Introducción	2
2. Metodología	3
2.1. Función de Costo	3
2.2. Representación de Cromosomas	4
2.3. Parámetros de Simulación	4
3. Resultados	5
3.1. Evolución del Algoritmo	5
3.2. Visualización de Rutas	5
4. Conclusiones	7

Resumen

Este informe presenta el desarrollo de un sistema inteligente para la optimización de rutas de autobuses urbanos mediante el uso de algoritmos genéticos y teoría de grafos. El problema se aborda modelando la ciudad como una red de nodos y aristas, donde se busca minimizar una función de costo híbrida que pondera tanto los costos operativos del proveedor de servicio como el tiempo de traslado de los usuarios. Se implementó una simulación sobre una matriz de demanda de pasajeros, identificando **hotspots** o puntos de alta afluencia. Los resultados demuestran la capacidad del algoritmo para generar rutas que reducen el tiempo de los pasajeros, aunque se destacan las complejidades de implementación en un entorno urbano real debido a factores legales y de zonificación.

1 Introducción

La optimización del transporte público en áreas metropolitanas como Guadalajara es un problema combinatorio de alta complejidad. El objetivo principal es encontrar un equilibrio eficiente entre dos fuerzas contrapuestas: la minimización de los costos operativos para las empresas transportistas y la reducción del tiempo de viaje para los usuarios.

En este proyecto, utilizamos grafos para crear un mapeo de las posibles rutas de transporte público en la ciudad. En este modelo:

- **Nodos:** Representan los posibles puntos de partida o llegada (paradas).
- **Aristas:** Representan las conexiones viales entre nodos.
- **Pesos:** Simulan el tiempo de recorrido entre cada nodo (calle o avenida).

A la par, se integra una matriz de demanda (Origen-Destino) que proporciona información sobre el flujo de pasajeros deseado entre un nodo A y un nodo B. Esto permite identificar **hotspots**, lugares de alta densidad de afluencia que el algoritmo debe priorizar.

2 Metodología

El núcleo del sistema se basa en una función de evaluación compuesta y una representación genética de las rutas.

2.1 Función de Costo

Nuestra función de costo no se limita a evaluar el camino más corto entre dos puntos (como en el algoritmo de Dijkstra tradicional), sino que evalúa una serie de rutas propuestas en el mapa de Guadalajara. La función objetivo J se define como:

$$J = (C_{operador} \cdot \beta) + (C_{usuario} \cdot \alpha) \quad (1)$$

Donde los componentes se definen de la siguiente manera:

- **Costo Operador ($C_{operador}$):** Se calcula en función de la duración de la ruta y los costos operativos.

$$C_{operador} \approx \text{Duración Ruta} \times \text{Costo por minuto} \quad (2)$$

Se consideran factores como mantenimiento, vida útil del equipo y salarios (simplificado a un costo base de 1 por minuto para la simulación).

- **Costo Usuario ($C_{usuario}$):** Representa el tiempo total invertido por los pasajeros.

$$C_{usuario} = \sum (\text{Pasajeros en tramo} \times \text{Tiempo de recorrido}) \quad (3)$$

- **Parámetros α y β :** Son escalares de ajuste que permiten definir la tendencia del algoritmo:

- Priorizar β : Rutas cortas, bajo costo operativo, menor cobertura.
- Priorizar α : Rutas largas, alta cobertura, menor tiempo de espera para el usuario.

2.2 Representación de Cromosomas

Para la aplicación del algoritmo genético, cada solución (individuo) se representa como un arreglo de rutas. La estructura del cromosoma es la siguiente:

```
[  
    [parada_1 (inicio), parada_2, ..., parada_20 (fin)], # Ruta 1  
    [parada_4, parada_6, parada_7, ...], # Ruta 2  
    ...  
]
```

Listing 1: Estructura del Cromosoma de Rutas

Cada sub-lista representa una ruta que toma el camión. Dado que existen múltiples nodos adyacentes, las paradas no necesariamente siguen un orden lineal geográfico estricto, permitiendo flexibilidad en la exploración del espacio de soluciones.

2.3 Parámetros de Simulación

Para asegurar una representación fiel a la realidad de la zona metropolitana, se utilizaron los siguientes parámetros:

Cuadro 1: Parámetros del Sistema

Parámetro	Valor / Descripción
Velocidad Caminando	5 km/h
Velocidad Camión	23 km/h (Promedio según MIDE Jalisco)
Multiplicador de tiempo	$T_{bus} = T_{caminando}/T_{bus_speed}$
Costo Operación Base	1 unidad/minuto
Rutas Troncales Existentes	21 (Referencia)
Generaciones	50
Rutas en simulación	10

3 Resultados

La simulación se ejecutó sobre un grafo que representa una aproximación de la ciudad (debido a la complejidad computacional de procesar la red completa con OSMnx).

3.1 Evolución del Algoritmo

A continuación se muestra el comportamiento del algoritmo a través de las generaciones.

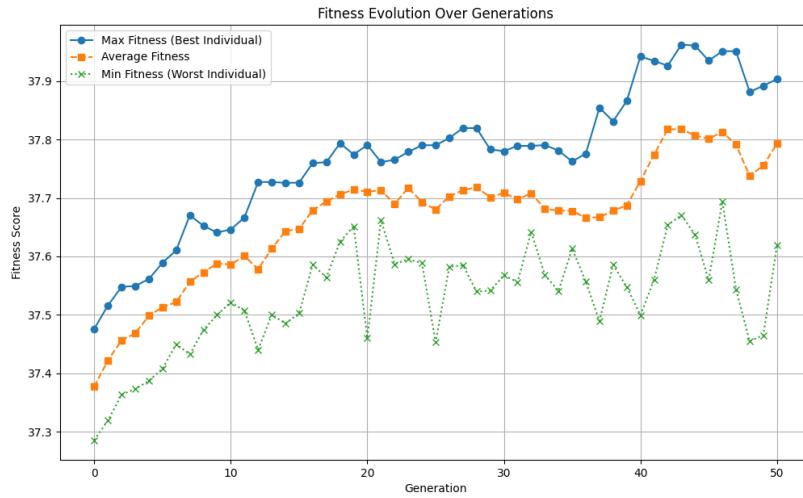


Figura 1: Evolución del Fitness a través de 50 generaciones. Se observa una mejora en la función de costo, estabilizándose cerca de la generación 43.

El algoritmo demostró capacidad de convergencia. En la generación 43, se alcanzó un *Current Fitness* por encima de 37.9, apartir del cual podemos ver un estancamiento en los valores de fitness lo que indica que el algoritmo genético exploró exitosamente el espacio de búsqueda no diferenciable.

3.2 Visualización de Rutas

Las rutas resultantes mostraron una tendencia interesante a sobreponerse con las líneas de infraestructura existente (Tren Ligero y Macrobús).

Gen 37 | Current Fitness: 37.85
Best Overall Fitness: 37.85

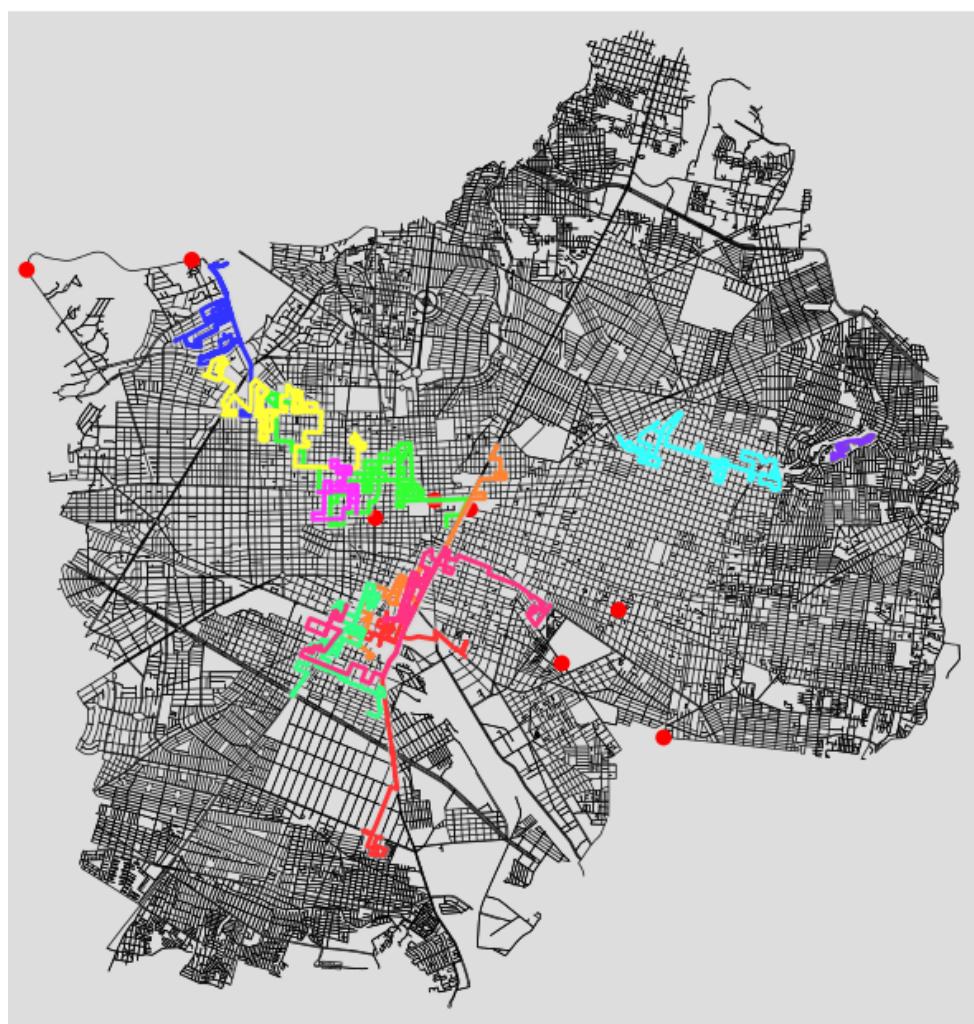


Figura 2: Visualización de las 10 rutas optimizadas sobre el grafo de la ciudad.

4 Conclusiones

El algoritmo genético prueba funcionar adecuadamente para encontrar rutas que minimizan el costo en tiempo para los pasajeros. Sin embargo, la transición de este modelo teórico a un desarrollo urbano real presenta desafíos adicionales que no pueden ser ignorados.

Aunque matemáticamente óptimas bajo la función de costo actual, no se puede asegurar que estas rutas sean viables sin considerar:

1. **Marco Legal y de Tránsito:** Restricciones de virajes, sentidos de calles y normativas de transporte público.
2. **Zonificación:** La distribución de zonas comerciales versus residenciales afecta los horarios pico, algo que una matriz de demanda estática no captura completamente.
3. **Densidad Poblacional:** Factores específicos de Guadalajara que añadirían mayor complejidad al modelado de los pesos en las aristas.

Como trabajo futuro, se propone revisitar la función objetivo para optimizar el procesamiento de grafos completos utilizando herramientas como OSMnx y refinar los pesos de las aristas con datos de tráfico en tiempo real.

Referencias

- [1] El Poder del Consumidor. (2015). *Urge transformación de transporte público en Guadalajara y Monterrey: usuarios pierden tiempo, dinero y calidad de vida.* Recuperado de: <https://elpoderdelconsumidor.org/2015/07/urge-transformacion-de-transporte-publico-en-guadalajara-y-monterrey-usuarios-pierden-tiempo-dinero-y-calidad-de-vida>
- [2] MIDE Jalisco. (s.f.). *Indicadores de Desarrollo.* Recuperado de: <https://mide.jalisco.gob.mx>
- [3] Boeing, G. (2025). *Modeling and Analyzing Urban Networks and Amenities with OS-Mnx.* Geographical Analysis. doi:10.1111/gean.70009
- [4] Wikipedia. (s.f.). *Anexo: Rutas de transporte en Jalisco.* Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Rutas_de_transporte_en_Jalisco