

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

PROYECTO DE GRADO
INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN

**Algoritmos Evolutivos en
sincronización de semáforos en el
Corredor de Garzón**

Alvaro Acuña
Efraín Arreche
2014

Supervisor: Sergio Nesmachnow

CENTRO DE CÁLCULO - INSTITUTO DE COMPUTACIÓN
MONTEVIDEO, URUGUAY

Algoritmos Evolutivos en sincronización de semáforos en el Corredor de Garzón

Acuña, Alvaro - Arreche, Efraín

Proyecto de Grado

Instituto de Computación - Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Montevideo, Uruguay, Marzo de 2015

ALGORITMOS EVOLUTIVOS EN SINCRONIZACIÓN DE SEMÁFOROS EN EL CORREDOR DE GARZÓN

RESUMEN

El proyecto propone el estudio de la sincronización de semáforos como problema de optimización multiobjetivo, y el diseño e implementación de un algoritmo evolutivo para resolverlo con alta eficacia numérica y desempeño computacional.

Se toma como aplicación la sincronización de semáforos en el Corredor de Garzón (Montevideo, Uruguay). La cantidad de cruces, calles, tráfico y semáforos lo hace un problema interesante desde el punto de vista de su complejidad. Además se ha admitido, por parte de las autoridades responsables, los problemas relacionados con la sincronización de los semáforos, por lo que todavía hay espacio para la mejora de los tiempos promedio de los viajes.

El problema de sincronización de semáforos es NP-difícil y no existe (hasta el momento) un método determinístico que lo resuelva. Se buscará mediante un algoritmo evolutivo llegar a una configuración aceptable de los semáforos maximizando la velocidad media tanto de ómnibus como de otros vehículos. El enfoque seguido es la obtención de datos reales relacionados a la red vial, tráfico y configuración de semáforos y la utilización del simulador de tráfico SUMO para generar los datos requeridos por el algoritmo.

El análisis experimental consiste en comparar los resultados del algoritmo con los valores obtenidos en la simulación de la realidad actual y además crear un escenario alternativo con modificaciones con el objetivo de obtener mejores métricas. Los resultados muestran que el algoritmo logra una mejora de hasta 24.2 % (21.40 % en promedio) en el valor de fitness comparando con la realidad actual, mientras el escenario alternativo obtiene una mejora de hasta 37.1 % (34.7 % en promedio) en el valor de fitness.

Palabras clave: Optimización, Sincronización semáforos, Corredor Garzón, simulación de tráfico, Algoritmo Genético multiobjetivo y paralelo, escenario real, Cluster

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación y contexto	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Enfoque	2
1.4. Limitaciones y alcance	2
1.5. Aportes	2
1.6. Estructura del documento	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Problema del tránsito vehicular	5
2.2. Corredores urbanos de tráfico	6
2.3. Corredor de Garzón	8
2.4. Sincronización de semáforos	10
2.5. Algoritmos Evolutivos	12
2.5.1. Algoritmos Genéticos	13
2.5.2. Algoritmos genético multiobjetivo	16
2.5.3. Algoritmo evolutivo paralelo	17
2.5.4. Implementacion y Frameworks	18
2.6. Simulación de tráfico	19
2.7. Trabajos relacionados	21
2.7.1. Resumen	25
3. Estrategia de resolución	27
3.1. Modelado del problema	27
3.1.1. Simulador SUMO (Simulation of Urban MObility)	27
3.1.2. Proceso del modelado	29
3.2. Arquitectura de la solución	34
3.3. Implementación: Biblioteca Malva	35
3.4. Especificación del Algoritmo Genético utilizado	36
3.4.1. Representación del cromosoma	37
3.4.2. Población inicial	39
3.4.3. Función fitness	39
3.4.4. Operadores	40
4. Análisis Experimental	43
4.1. Desarrollo y Plataforma de ejecución	43
4.2. Ajuste paramétrico	44

4.2.1.	Pesos de la función fitness	44
4.2.2.	Tiempo de simulación	45
4.2.3.	Criterio de parada	45
4.2.4.	Tamaño de la población	46
4.2.5.	Probabilidad de mutación y cruzamiento	46
4.3.	Descripción de escenarios	48
4.3.1.	Caso base o realidad actual del corredor	48
4.3.2.	Escenario alternativo	49
4.4.	Resultados	49
4.4.1.	Valores numéricos del caso base	49
4.4.2.	Resultados numéricos de la evaluación	50
4.4.3.	Detalles del escenario alternativo	51
4.4.4.	Resultados de la evaluación sobre el escenario alternativo	54
4.4.5.	Variación de la función de fitness	55
4.4.6.	Eficiencia computacional	56
5.	Conclusiones y trabajo futuro	59
5.1.	Conclusiones	59
5.2.	Trabajo futuro	59
	Bibliografía	60

Índice de figuras

2.1. Evolución en la venta de automóviles por año. El valor más bajo corresponde al año 2003, y el más alto 2013. Imagen extraída de Autoanuario (2014).	6
2.2. Gráfica de costos de transporte en función de la gente transportada. En el eje horizontal: cantidad de pasajeros por hora. Eje vertical: costo en millones de dólares por kilómetro. BRT (Bus Rapid Transit), LRT(Light Rail Train)- Imagen original extraída de (Institute for Transportation & Development Policy (ITDP), 2007)	7
2.3. Localización del Corredor de Garzón en Montevideo - Imagen original extraída de www.montevideo.gub.uy	8
2.4. Perfil propuesto para el corredor Garzón desde San Quintín a Camino Colman - Imagen original extraída de (IMM, 2010)	10
2.5. Distintas fases para dos cruces en una red de tránsito	11
2.6. La evolución se produce al mejorar el fitness de la población a lo largo de las generaciones.	13
2.7. Representación binaria de un cromosoma.	14
2.8. Cruzamiento de un punto	15
2.9. Mutacion por inversión binaria	15
2.10. Modelo Maestro-Eslavo	18
3.1. Simulación de tráfico en SUMO en el cruce entre Bulevar Battle y Ordoñez y el Corredor Garzón.	29
3.2. A la izquierda el mapa extraído de OSM, a la derecha el mapa procesado listo para ser usado en SUMO. El corredor Garzón está en el centro de cada imagen.	30
3.3. Ejemplo de planilla electrónica para el conteo manual en Camino Ariel	31
3.4. Mapa del TrafficModeler con las áreas de tráfico. Círculos del mismo color indican tráfico especificado entre esas áreas	33
3.5. Arquitectura de la función de fitness	34
3.6. Cromosoma de 2 cruces	38
3.7. Representación de Sumo	38
3.8. Representación de una fase de los semáforos para un cruce. Cada número se corresponde a una letra en la secuencia de <i>state</i> del archivo de configuración del simulador SUMO.	39
3.9. Visualización del cruzamiento entre individuos.	40

4.1. Resumen representativo de ejecuciones del algoritmo para establecer el criterio de parada.	45
4.2. Gráfica con combinaciones de probabilidad de cruzamiento(pc) y de mutación (pm)	47
4.3. Comparación de la duración en minutos de los viajes para ómnibus y otros vehículos en el recorrido completo del corredor Garzón para los diferentes tipos de tráfico.	50
4.4. Gráfico de paradas alternativas. Gris: Parada Eliminada. Azul: línea G de Coectc y de Cutcsa. Rojo: línea G de Coectc. Violeta: G de Cutcsa. - Imagen original extraída de montevideo.gub.uy	52
4.5. Comparación de la duración en minutos de los viajes para ómnibus y otros vehículos en el recorrido completo del corredor Garzón para los diferentes tipos de tráfico. Al aplicar el algoritmo sobre el escenario alternativo. . . .	54
4.6. Comparación de los speedup promedios para cada tipo de tráfico. Se representa el caso serial que corresponde al speedup=1 para fines de comparación. .	58

Índice de cuadros

3.1. Resumen del revelamiento del tráfico en la zona del corredor Garzón. Se muestra la cantidad de vehículo y la orientación hacia donde circulan. . .	32
4.1. Comparación de fitness para distintas poblaciones	46
4.2. Combinaciones de probabilidad de cruzamiento(pc) y de mutación (pm) .	47
4.3. Resultados del caso base mostrando la velocidad promedio ómnibus (vpb) y velocidad promedio vehículos(vpv) para los distintos tipos de tráfico . .	49
4.4. Resultados luego de ejecutado el algoritmo mostrando velocidad promedio ómnibus (vpb) y de otros vehículos(vpv) para los distintos tipos de tráfico	50
4.5. Valores del escenario alternativo con su velocidad promedio ómnibus (vpb) y velocidad promedio vehículos(vpv) comparando el fitness para el tráfico medio	53
4.6. Mejoras obtenidas para las velocidades promedio de los ómnibus(vpb) y de otros vehiculos (vpv) en el escenario alternativo para distintos tipos de tráfico	53
4.7. Mejoras obtenidas al aplicar el algoritmo sobre el escenario alternativo. Comparando las velocidades de ómnibus(vpb), otros vehículos(vpv) y el fitness con cada tipo de tráfico contra el caso base o realidad actual. . . .	54
4.8. Modificación de los pesos para ómnibus (pb) y para otros vehículos (pv) en la función fitness. Analizando las variaciones en la velocidad promedio de ómnibus (vpb), otros vehículos (vpv) y fitness.	56
4.9. Análisis de eficiencia computacional comparando los tiempos de ejecución en serial y paralelo en minutos.	57

Índice de Algoritmos

1.	Algoritmo Genético	16
2.	Algoritmo Evolutivo MultiObjetivo. En rojo se indican las diferencias con el algoritmo evolutivo genérico.	17
3.	Algoritmo Genético de Malva.	37

Capítulo 1

Introducción

He llamado a este principio, por el cual cada pequeña variación, si útil, es preservada, con el término de Selección Natural

— Charles Darwin, El origen de las especies

En esta sección se pretende introducir al lector en el contexto general donde se desarrolla este trabajo así como los objetivos buscados.

1.1. Motivación y contexto

Los algoritmos evolutivos han demostrado su utilidad en problemas complejos y particularmente uno de ellos es la sincronización de semáforos. Se busca desarrollar un algoritmo que logre resolver este problema con buenas métricas. Por la flexibilidad inherente de este algoritmo es que no está destinado a resolver el problema en una zona en particular sino que se podría aplicar en forma general.

En este sentido se eligió la zona del corredor Garzón que presenta particularidades que la destacan y la hacen interesante desde el punto de vista de la investigación. Su complejidad viene dada por el largo del tramo, la cantidad de cruces y semáforos, las distintas reglas de tráfico (por ejemplo exclusividad del ómnibus, o distinción para doblar a la izquierda), circulación de tráfico vehicular y transporte público, calles no paralelas, entre otros.

1.2. Objetivos

Estos son los objetivos básicos que se plantearon al inicio del proyecto:

- Estudio del problema del tráfico y la sincronización de semáforos.
- Revelamiento de información sobre trabajos relacionados en este ámbito.
- Creación de un algoritmo evolutivo paralelo que resuelva el problema en la zona del corredor Garzón.
- Creación de un mapa y configuración relativa a semáforos, tráfico y reglas de tránsito que sea precisa y obtenida de la realidad actual.
- Aplicación de técnicas de computación de alto desempeño para aumentar el rendimiento de la solución.

1.3. Enfoque

Desde un principio se intentó dotar al proyecto de una buena aproximación de la realidad, en tal sentido se realizaron reuniones con el Ing. Juan Pablo Berta del Servicio de Ingeniería de Tránsito de la Intendencia de Montevideo en Agosto del 2014 y con el Ing. Daniel Muniz del departamento de Informática de la Intendencia en Setiembre de 2014 para conocer la situación del tráfico capitalino, aprender de su experiencia y obtener datos que nos fueran útiles para el proyecto.

Buscando una aproximación aún más precisa se realizaron trabajos de campo para determinar la configuración de los semáforos, la densidad de tráfico y el tiempo del recorrido. El mapa y la frecuencia de ómnibus son de acceso público así como el simulador utilizado.

Se creará un programa que implemente un algoritmo evolutivo multiobjetivo que utiliza un simulador de tráfico para obtener las métricas a optimizar. Se busca obtener una nueva configuración de semáforos que en las simulaciones se comporte mejor que la situación actual basándonos en la velocidad promedio de ómnibus y del resto de los vehículos.

Dada la complejidad del problema el algoritmo se ejecutará en paralelo y se utilizará la plataforma Cluster Fing para poder acelerar el tiempo real de procesamiento. Además se creará un escenario alternativo con modificaciones de la realidad actual con el objetivo de mejorar las métricas.

1.4. Limitaciones y alcance

La zona modelada comprende todo el tramo del Corredor Garzón y dos caminos paralelos a ambos lados, que dada la configuración de las calles las cuales corren en diagonal agregó complejidad al proceso. El relevamiento de tráfico hecho in-situ fue realizado para cinco cruces representativos del corredor Garzón. Se busca una aproximación útil y no un estudio detallado sobre el tráfico en la zona.

Dado que se pretende modelar es el tráfico vehicular y transporte público no se realiza una simulación de peatones.

1.5. Aportes

- Se desarrolló un sitio web en la siguiente dirección: <http://www.fing.edu.uy/inco/grupos/cecal/hpc/AECG> donde los interesados podrán acceder a información sobre el proyecto y los resultados.
- Se realizó un *paper* en idioma inglés de 10 páginas con el objetivo de presentarlo en conferencias internacionales.
- El proyecto fue presentado en Ingeniería de Muestra 2014, siendo bien recibido por el público. Constatando de primera mano que la problemática es real, llegando a la conclusión que los Ingenieros tienen las herramientas necesarias para solucionar problemas que afectan directamente a la sociedad.

1.6. Estructura del documento

En el siguiente capítulo se hace un repaso sobre fundamentos teóricos necesarios para comprender el resto del trabajo. Se da información sobre corredores y en concreto el Corredor Garzón, así como un repaso breve sobre algoritmos evolutivos y simuladores de tráfico. Además se muestran los trabajos relacionados haciendo especial foco en algoritmos genéticos para la sincronización de semáforos.

En el capítulo 3 se explica como se modela el problema y la arquitectura diseñada para resolverlo. Luego se comenta el trabajo de campo realizado para obtener datos de la realidad utilizados en la solución. Además se detalla el algoritmo genético utilizado así como la biblioteca y herramientas usadas.

El capítulo 4 cuenta con la descripción de los escenarios, los resultados de la evaluación del algoritmo y las comparaciones realizadas. Se presenta el escenario que modela la situación actual y el escenario alternativo con modificaciones, los cuales se evalúan con el algoritmo. Además se realizan pruebas para comprender como varía el algoritmo al modificar su función de fitness y se realiza un breve análisis de la eficiencia computacional del algoritmo.

El capítulo 5 da las conclusiones finales y el trabajo a futuro que se puede realizar.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se aborda el marco teórico necesario para comprender más fácilmente el desarrollo de los capítulos posteriores. Se analiza el problema del tráfico en general y soluciones como la construcción de corredores exclusivos para el transporte público. En este contexto se detalla el Corredor de Garzón, tanto su descripción como sus problemas. Luego se da un breve repaso sobre los simuladores de tráfico y la teoría detrás de los algoritmos evolutivos. Para finalizar se encuentra una lista con trabajos relacionados para mostrar otras soluciones y variantes.

2.1. Problema del tránsito vehicular

En gran parte del mundo se está produciendo un crecimiento sostenido del parque automotor, lo cual ocasiona una serie de problemas relacionados con el agravamiento de las congestiones vehiculares que afectan la calidad de vida de las personas. (CEPAL, 2003). Este problema tiene un gran impacto en el desarrollo de las ciudades por lo que es un componente principal en los planes estratégicos para su crecimiento.

La congestión ocasiona una progresiva merma de la velocidad promedio de circulación con la consecuencia del incremento en la duración de los viajes y del consumo de combustible. Esto repercute en la contaminación atmosférica y sonora que impacta directamente en la salud de las personas, además se genera una exigencia en las vías de tránsito que ocasiona un deterioro mayor de calles y rutas.

Uruguay no escapa a este fenómeno, en particular Montevideo, donde el aumento del parque automotor está en ascenso constante desde el 2005 (INE, 2014). Y según proyecciones el crecimiento seguiría en un promedio de 4.5 % anual hasta el 2020. (BBVAResearch, 2013) Esto viene de la mano con el sostenido aumento de las ventas de vehículos desde el 2003 (Autoanuario, 2014)

Los expertos indican que la congestión ya está instalada y la infraestructura vial no acompasó este crecimiento. Montevideo es la ciudad con más semáforos por automóvil en Latinoamérica, con más de 620 cruces semaforizados, alguno de los cuales no están coordinados. (Subrayado, 2013)

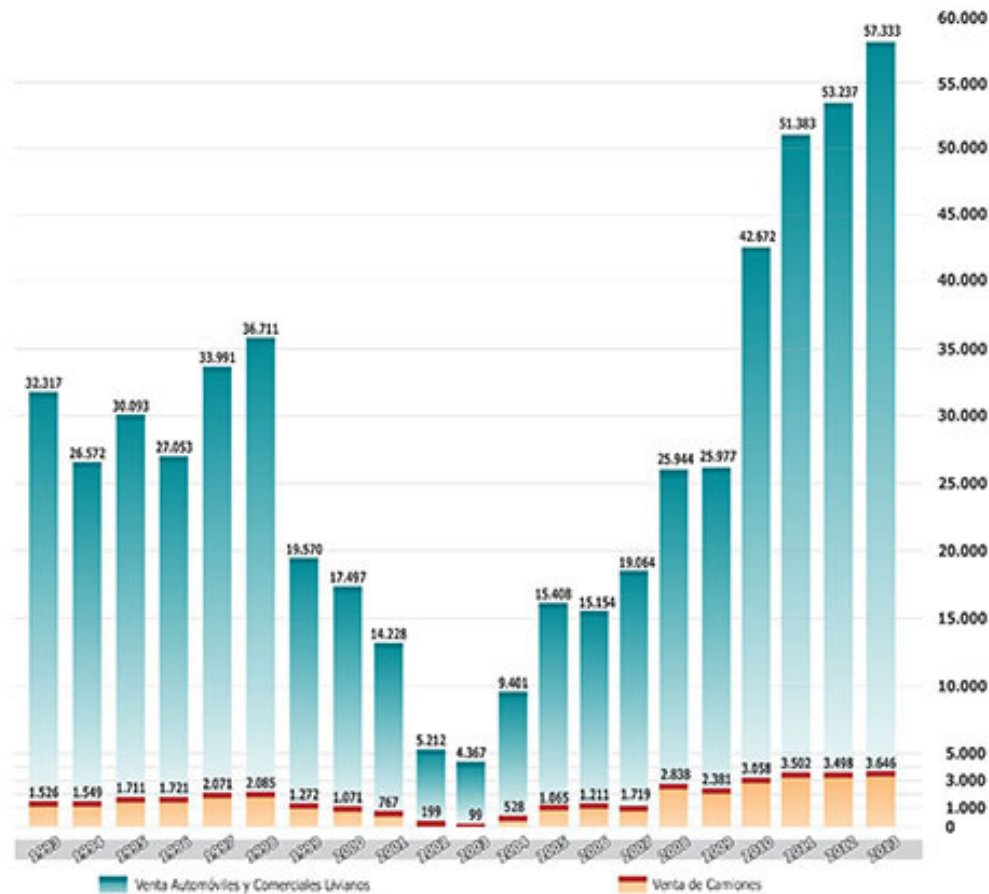


Figura 2.1: Evolución en la venta de automóviles por año. El valor más bajo corresponde al año 2003, y el más alto 2013. Imagen extraída de Autoanuario (2014).

En un contexto global el crecimiento en la circulación de automóviles provoca que baje el nivel de aceptación del transporte público cuyo servicio en general es ineficiente. Para resolver este problema las autoridades suelen optar por sistemas de transporte costosos como los *metros* pero se ha demostrado que existen otras opciones viables como el BRT (Bus Rapid Transit / ómnibus de tránsito rápido)(Eugenio Bañobre, 2009).

En el caso de Montevideo para solucionar este problema se está implementando el Plan de Movilidad Urbana (IMM, 2010) con el objetivo de mejorar la eficiencia del transporte público y democratizar el acceso al mismo. El sistema de transporte está inspirado en un BRT con la construcción de varios corredores exclusivos en la ciudad. En la siguiente sección se dará más información sobre los BRT, corredores urbanos y en particular el Corredor de Garzón.

2.2. Corredores urbanos de tráfico

El corredor urbano de tráfico, también llamado corredor segregado, se caracteriza por una separación física entre el carril de circulación de los ómnibus y los carriles para el resto del tráfico. Esta es la principal diferencia con un concepto similar llamado *carril de sólo bus* en donde se separan por líneas horizontales pintadas en la calle indicando

que sólo pueden circular ómnibus. Los carriles de *sólo bus* suelen fracasar por falta de control que evite que el tráfico los invada. En el caso de Montevideo el carril *sólo bus* está sobre la derecha, por lo que los vehículos privados lo invaden al virar a la derecha y lo mismo los taxis para levantar pasajeros. Al hacer los corredores alineados en el medio del tráfico se evitan esos problemas.

Las ciudades de países en vías de desarrollo deben estudiar si pueden instalar corredores pues son fundamentales para conseguir mayores velocidades en el sistema. Pero hay muchas posibilidades y no todas pueden ser aplicables por el contexto zonal, cultural o de inversión necesaria.

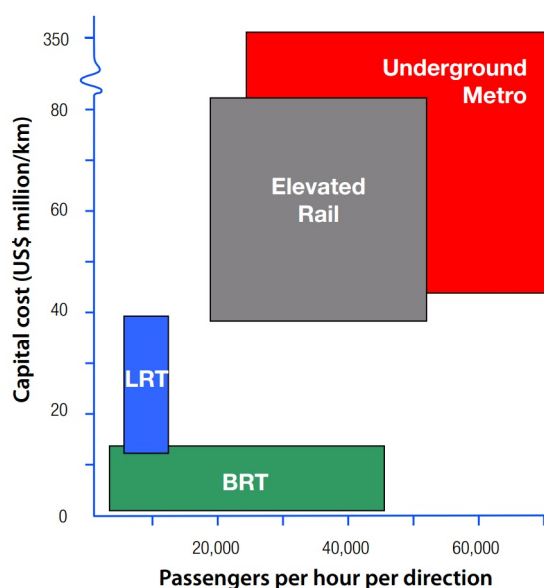


Figura 2.2: Gráfica de costos de transporte en función de la gente transportada. En el eje horizontal: cantidad de pasajeros por hora. Eje vertical: costo en millones de dólares por kilómetro. BRT (Bus Rapid Transit), LRT(Light Rail Train)- Imagen original extraída de (Institute for Transportation & Development Policy (ITDP), 2007)

Bus Rapid Transit (BRT) es una solución innovadora, de alta capacidad y de menor costo para el transporte público que puede alcanzar el rendimiento y los beneficios de sistemas ferroviarios con un costo significativamente menor. Se trata de un sistema integrado de movilidad basado en ómnibus para el transporte de los pasajeros a sus destinos de manera rápida y eficiente. Al mismo tiempo ofrece la flexibilidad necesaria para satisfacer una variedad de condiciones locales. Los elementos del sistema de BRT pueden ser fácilmente personalizados a las necesidades de la comunidad e incorporan tecnologías de última generación de bajo costo que atraen a más pasajeros y en última instancia ayudan a reducir la congestión de tráfico en general.

Un BRT contiene características similares a un tren ligero o el sistema de metro por lo que es mucho más confiable, conveniente y más rápido que los servicios regulares de ómnibus. Con las características adecuadas, el BRT es capaz de evitar las causas de los retrasos que suelen tener los servicios regulares de ómnibus, como estar atrapado en el tráfico y hacer cola para pagar a bordo.

2.3. Corredor Garzón

Fue construido como parte del Plan de Movilidad Urbana que incluye otros corredores en la ciudad de Montevideo. (IMM, 2010). Conecta los barrios de Colón, Sayago, Belvedere y Paso Molino. Tiene una extensión de 6.5km con 24 cruces semaforizados, en donde se encuentran calles importantes como Millán que conecta con una autopista (Ruta 5) y Bulevar Batlle y Ordoñez la cual tiene una gran densidad de tráfico. Es importante aclarar que no es sólo una conexión de extremo a extremo ya que se encuentra en una zona densamente poblada cuyos barrios tienen al corredor como la principal vía de movilidad.



Figura 2.3: Localización del Corredor de Garzón en Montevideo - Imagen original extraída de www.montevideo.gub.uy

Como se aprecia en la figura 2.4 el corredor consiste básicamente de tres calles paralelas e independientes; dos de ellas con dos carriles de una sola mano y entre medio de éstas se encuentra una calle doble vía con un carril para cada vía que es exclusivamente usado por ómnibus urbanos durante el día y también por suburbanos en la noche.

Basándonos en el standard antes mencionado, el Corredor de Garzón cumple con la definición de BRT por los siguientes puntos:

- Largo mínimo del corredor: 3 km de corredor exclusivo
- Vía de ómnibus dedicada: al tener un 90 % de segregación física dentro del corredor.
- Alineación de la vía del ómnibus: por estar constituido por dos carriles centrales para el ómnibus en medio de los carriles de otros vehículos.

- Tratamiento de intersecciones: por prohibir algunos virajes a la izquierda y el carril de ómnibus tener prioridad en la mayoría de las intersecciones.

Analizando las recomendaciones del standard hay algunas que no están totalmente aplicadas al corredor, entre ellas destacamos:

- Cobrar el boleto fuera del ómnibus: uno de los factores más importantes para mejorar la experiencia del usuario así como también la velocidad en zonas de mucha carga es que hayan al menos algunas estaciones (no solo paradas de ómnibus) donde el boleto se cobre (o se use tarjeta de transporte) al entrar a la estación.
- Servicios expresos o limitados: Una forma de mejorar las velocidades de operación consiste en crear líneas que no se detengan en todas las paradas (evitando aquellas paradas con menor demanda de pasajeros) y poner más ómnibus en la calle.
- Carril extra para adelantarse en paradas: este carril resulta critico en sistemas de transporte colectivo de gran porte para poder manejar los servicios expresos. En sistemas de baja demanda es una buena inversión y en el caso del corredor de Garzón podría permitir que los servicios suburbanos funcionaran durante todo el día por el corredor, mejorando así el transporte público y privado.
- Distancia entre paradas e intersecciones: según el standard, la mínima distancia entre la intersección y la parada es de 26m pero idealmente deberían ser 40m para evitar retrasos. En el Corredor Garzón las paradas están sobre las intersecciones y hay varias donde se detiene más de una línea de ómnibus. Esto puede ocasionar problemas dado que mientras uno o dos ómnibus ya realizaron la parada y esperan por el semáforo, los demás que lleguen generarán una fila aguardando por detenerse en la parada para levantar a los pasajeros y posiblemente luego, cuando lleguen al cruce no tendrían la luz verde.
- Tener estaciones centrales o conexión entre paradas: la ausencia de paradas en el centro de los dos carriles de ómnibus, hace que sea una construcción más cara (hay que hacer dos paradas). El hecho de que no haya una conexión física por la cual el pasajero pueda cambiar de recorrido de un lado al otro sin tener que cruzar la calle, lo hace menos eficiente y más inseguro.
- Distancia entre estaciones: las paradas deberían estar a una distancia de entre 300m y 800m, siendo 450m la distancia óptima tanto para el pasajero como para el transporte.
- Puertas de los ómnibus: con el fin de mejorar el flujo y volumen de pasajeros, sería conveniente contar con dos puertas anchas o más de tres puertas comunes.
- Semáforos: un corredor debe de funcionar al igual que una autopista en el sentido de que una vez que se entra debería ser posible mantener la velocidad máxima sin tener que detenerse seguido, por lo que no deberían de haber semáforos cerca uno de otro. De haberlos la sincronización será la clave para minimizar los tiempos de espera.
- Calles paralelas: tener calles paralelas es de vital importancia para un corredor ya que una de las formas de minimizar los tiempos de espera es prohibir los giros a la izquierda, y una calle paralela provee la facilidad de poder realizarlo.

- Giro a la derecha con luz roja: actualmente en muchos países se encuentra reglamentada una ley que permite a los conductores doblar a la derecha con luz roja ya que la misma (a menos que se especifique) es tomada como un cartel de *pare solamente* para doblar a la derecha. Esta ley en donde esta aprobada acorta los tiempos de luz verde de las transversales mejorando así la velocidad promedio en los corredores o calles importantes.
- Mejor calidad de estaciones: las paradas deberían ser a prueba del clima, con puertas corredizas que abren cuando hay un ómnibus (para que nadie caiga al corredor), con información al pasajero en tiempo real, etc. No harían al corredor más rápido pero si más seguro, cómodo y confiable.



Figura 2.4: Perfil propuesto para el corredor Garzón desde San Quintín a Camino Colman - Imagen original extraída de (IMM, 2010)

Desde su construcción el corredor ha recibido críticas debido a que su principal objetivo de agilizar el transporte público no fue cumplido. Luego de intentos de mejoras al respecto se ha vuelto a la velocidad promedio que existía antes de realizar el corredor para el transporte público (ElPais, 2015).

Las autoridades admitieron que se han cometido errores, y que no se ha logrado sincronizar los semáforos (ElPais, 2013). Un buen funcionamiento de los mismos es fundamental para asegurar que el tráfico se mueva con eficiencia y a la vez aporte seguridad a los peatones. A continuación se tratará este tema.

2.4. Sincronización de semáforos

El problema de la optimización del tráfico se refiere a los métodos cuyo objetivo es mejorar el flujo de vehículos en una red vial. Estos se pueden clasificar en dos categorías: influir en el comportamiento de los conductores (configuración de semáforos, señalización, etc) o modificaciones en las rutas (agregado de un nuevo carril, ensanchar calles, etc). Estos últimos pueden producir mejoras drásticas pero requieren una inversión monetaria y espacio físico que muchas veces no está disponible. Por esta razón los métodos destinados a influir en el comportamiento de los conductores se presentan como una mejor o única opción.

En este sentido los métodos para la sincronización de semáforos son de los más efectivos para agilizar el tránsito y no generar congestiones, aumentando la velocidad promedio de los viajes y mejorando las perspectivas de desarrollo de la ciudad así como la calidad de vida de sus habitantes.

La fase se refiere a una configuración específica de luces de semáforos en una intersección, que permiten el movimiento de ciertos flujos de tráfico. Como se ve en la figura 2.5 cada intersección puede tener diferente número de fases y también distintas duraciones. Estas suelen ser configuradas y establecidas manualmente por técnicos especializados basados en su experiencia, aunque en ciertas ocasiones se utilizan simulaciones para obtenerlas.

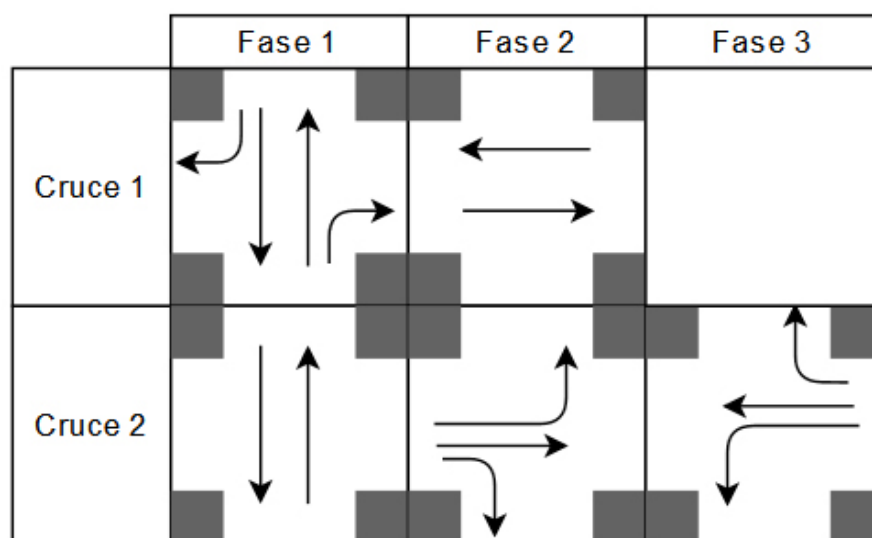


Figura 2.5: Distintas fases para dos cruces en una red de tránsito

Existen tres parámetros importantes a tener en cuenta que determinarán el comportamiento del sistema: la duración de fase, los ciclos de las luces y los valores de *offset*. A continuación se explica cada uno de ellos:

- **Duración de fase:** Se refiere a la duración en que una configuración específica de luces esta activa en una intersección. Un conjunto de ellas estará en verde y otras en rojo determinando quien cruza en ese momento. La elección correcta de este parámetro es fundamental; las calles con una densidad de tránsito mayor tendrían que tener más tiempo para cruzar. Realizar la optimización individual de estos cruces no tiene por qué llevar a una solución óptima en la red, ya que se pueden producir cambios en el flujo que afecten a las demás. Por esta razón se debe tener un enfoque global al modelar la solución.
- **Duración del ciclo:** Un ciclo representa un conjunto de fases, en general su duración es la suma de las duraciones de las fases. Como indica su nombre el ciclo se repetirá una vez se completa. La duración puede incrementarse o decrementarse para permitir mayor cantidad de repeticiones de las fases. Otro punto a considerar sobre todo en intersecciones complejas es el orden en el cual las fases son ejecutadas.
- **Offset:** Indica en que fase comienza el ciclo o en que momento, permitiendo que las intersecciones comiencen su ciclo en diferentes momentos, esto es muy importante para sincronizar un flujo de tráfico en lo que se conoce como *línea verde*, en donde los vehículos logran pasar todas las intersecciones sin detenerse.

Estos parámetros pueden ser utilizados a la hora de sincronizar los semáforos de una zona, buscando una optimización global de la red. También hay que tener en cuenta el desarrollo de soluciones seguras siendo lo más básico que no existan intersecciones donde ambos flujos crucen a la misma vez.

Los métodos para lograr la coordinación necesaria van desde simples mecanismos de reloj a sistemas computarizados que se ajustan en tiempo real con ayuda de sensores en la calle, pudiendo clasificarse como estrategias de tiempo fijo, o de tiempo dinámico auto-ajustable.

Se considera a este problema como NP-difícil, es decir que no existe hasta el momento un método determinístico que lo resuelva.

Existen diversos métodos computacionales para solucionar este problema alguno de los cuales se encuentran en la sección de trabajos relacionados. Entre los más desarrollados y efectivos están los algoritmos evolutivos en particular los algoritmos genéticos que serán explicados a continuación.

2.5. Algoritmos Evolutivos

Los algoritmos evolutivos son un conjunto de técnicas heurísticas para la resolución de problemas complejos que se inspiran en la evolución natural, trabajan sobre una población de individuos que representan una solución y utilizan mecanismos de selección, reproducción y diversidad para lograr su objetivo. Es una técnica iterativa que busca en cada paso mejorar las soluciones por medio de operadores basado en un criterio predefinido a maximizar o minimizar.

Se pueden destacar cuatro etapas en la ejecución del algoritmo evolutivo. Estos son:

- Evaluación: Para cada individuo de la población se determina un valor de aptitud (fitness) en relación a su capacidad para resolver el problema.
- Selección: Proceso en donde se eligen cuales son los individuos que sobrevivirán a la siguiente generación y sobre los cuales se aplicaran los operadores.
- Operaciones: Se aplican tanto combinaciones entre individuos (cruzamiento), como operadores de diversidad (mutación). Esto genera nuevos individuos en la población.
- Reemplazo: Se produce el recambio generacional, sustituyendo a la antigua población por una nueva que podría tener sobrevivientes de la anterior o solamente nuevos individuos generados en la etapa anterior.

Se han desarrollado varias líneas de investigación diferenciadas que aplican estas técnicas, alguna de ellas se describen a continuación:

- Estrategias de Evolución: Propuesto por Rechenberg (1971), comenzó como un método de optimización utilizando individuos compuestos por números reales en problemas relacionados al diseño de ingeniería. Su característica principal es que utilizan el operador de mutación como motor para la evolución. Aunque modelos más recientes agregan otro tipo de mecanismos.
- Programación genética: Intenta generar un programa de computación para resolver una tarea específica. Cada individuo puede ser un programa que es representado

en forma de árbol, de esta manera la combinación entre individuos se realiza de forma más sencilla. La función de aptitud se refiere a que tan cerca de resolver la tarea se encuentra el individuo.(Koza, 1992)

- Algoritmos Genéticos: El más popular de los algoritmos evolutivos, aplicado para resolver problemas de optimización. El operador de cruzamiento es el principal motor evolutivo siendo el de mutación el secundario. En la siguiente sección se darán más detalles sobre los mismos.

2.5.1. Algoritmos Genéticos

La idea base es que partiendo de una población inicial de individuos se seleccionan los mejores en base a su aptitud respecto a solucionar el problema y estos se utilizan para generar nuevos individuos ya sea por combinación o modificación. Por tanto en cada paso obtenemos mejores soluciones hasta detenernos usando un criterio de parada, ya sea el número de iteraciones o cuando ya no se puede mejorar más la solución. Los trabajos de Goldberg (1989) y Mitchell (1996) brindan más detalles sobre los mismo.

Un individuo es una codificación de la solución que resuelve el problema. La población inicial puede generarse aleatoriamente o basándose en algún conocimiento previo. La función de evaluación o fitness indica que tan buena o apta es una solución en comparación con las demás. En cada iteración la cual se conoce como generación se aplican operadores de cruzamiento, estos son formas de combinar a los individuos para obtener otros que potencialmente sean una mejor solución y también cambios aleatorios sobre los individuos llamado mutación.

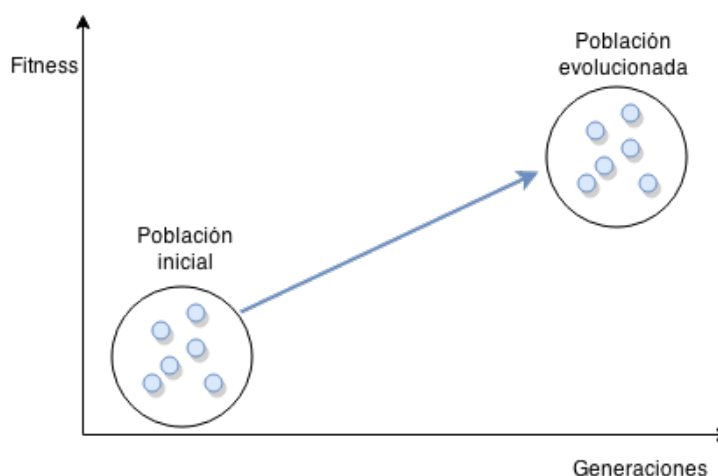


Figura 2.6: La evolución se produce al mejorar el fitness de la población a lo largo de las generaciones.

Por tanto se van seleccionando, combinando y cambiando las mejores soluciones en un proceso que va obteniendo mejores soluciones. El criterio de parada nos indica cuando termina este proceso, ya sea por que se alcanzó un número de generaciones predefinidos o por que la mejora no es evidente. Al final se devuelve la mejor solución encontrada en todo el proceso.

Hay que indicar que no es una técnica exacta pero logra muy buenas aproximaciones, además es muy buena en problemas complejos por su flexibilidad y robustez.

Representación de soluciones

No podemos trabajar directamente sobre las soluciones, por lo que tenemos que codificarlas en un modelo que nos sirva para poder aplicar el algoritmo. La inspiración biológica se ve en los nombres que adopta esta representación, llamada Cromosoma que es un vector de genes y cada valor de un gen se llama alelo. En general se codifica un vector de números binarios o reales de largo fijo, lo que facilita la aplicación de los operadores.

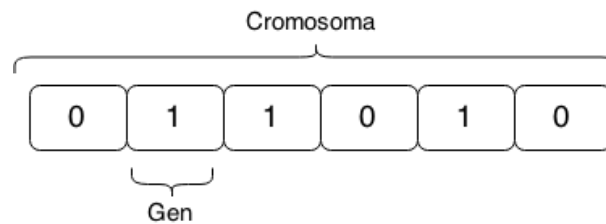


Figura 2.7: Representación binaria de un cromosoma.

Función de Evaluación

Indica qué tan bueno es un individuo para resolver el problema en cuestión con un valor conocido como Fitness. Este se utiliza para seleccionar a los mejores y de esta forma guiar la exploración hacia la mejor solución. Se deben tener en cuenta las restricciones del problema para que las soluciones no factibles no sobrevivan. En general es donde se consume el mayor tiempo del algoritmo en comparación con los demás operadores.

Operador de Selección

Existen diversos operadores de selección, su función es que las mejores características de los individuos se mantengan en las siguientes generaciones. Los tipos más populares son:

- Ruleta: También conocida como selección proporcional elige aleatoriamente individuos en la cual la probabilidad de selección es proporcional al valor de fitness.
- Torneo: Se elige aleatoriamente un determinado número de individuos los cuales compiten entre sí usando su valor de fitness.
- Rango: Se ordenan los individuos por fitness y se seleccionan los mejores.

Cruzamiento

Su función es combinar individuos con el objetivo de preservar las mejores características y así lograr mejores soluciones. Existe una tasa que se puede modificar para indicar la probabilidad de que se realice el cruzamiento.

- Cruzamiento de un punto: A partir de dos padres se selecciona un punto al azar de los cromosomas obteniendo dos trozos que se combinan para obtener dos hijos. Se explica en la figura 2.8
- Cruzamiento multipunto: El método anterior se puede generalizar para obtener más puntos de corte y más recombinaciones.

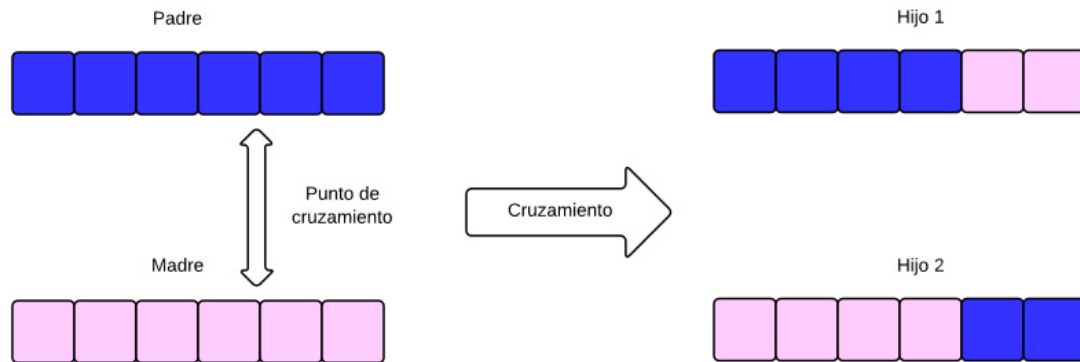


Figura 2.8: Cruzamiento de un punto

Mutación

Indica el método utilizado para modificar un individuo, esto se realiza para lograr más diversidad y no caer en máximos locales. En general aplica una modificación aleatoria en el cromosoma. Hay una tasa de probabilidad para aplicar este operador que en general es muy baja.



Figura 2.9: Mutacion por inversión binaria

Reemplazo

Luego de que se aplica el cruzamiento se insertan nuevos individuos que aumentan la población original por tanto este operador indica cual es el criterio que debemos tomar para crear una nueva población con una cantidad de individuos igual a la original. Se podría reemplazar todos los padres por los hijos, o seleccionar cuales reemplazar, entre otros criterios.

Criterio de parada

Indica cuando debe terminar el algoritmo, puede ser definiendo un número fijo de generaciones o analizando si el mejor valor de fitness se mantiene relativamente constante durante un número determinado de generaciones entre otros criterios. El objetivo será encontrar un compromiso entre un buen resultado y un tiempo acorde de ejecución, ya que el algoritmo no arrojará un valor exacto sino una buena aproximación.

Funcionamiento

El esquema básico de funcionamiento es el siguiente:

Algoritmo 1 Algoritmo Genético

```

1: Inicializo( Pob(0))
2: generacion = 0
3: while No llegue al criterio de parada do
4:   Evaluar Pob(generacion)
5:   Padres = Seleccionar(Pob(generacion))
6:   Hijos = Cruzamiento(Padres) y Mutacion(Padres)
7:   NuevaPob = Reemplazar Pob(generacion) con Hijos
8:   generacion++
9: end while
10: return Mejor solución

```

2.5.2. Algoritmos genético multiobjetivo

Los problemas de optimización multiobjetivo trabajan sobre un espacio multidimensional de funciones y no tienen una única solución por esto el significado de óptimo cambia. Una solución es un óptimo de Pareto si ninguna de las funciones objetivos puede mejorar su valor sin degradar otro de los valores objetivos. Todas estas soluciones son consideradas igualmente buenas ya que los vectores no se pueden ordenar completamente. Al conjunto de los valores funcionales de los óptimos de Pareto se les llama frente de Pareto.

Existen algoritmos evolutivos para resolver el problema de la optimización multiobjetivo estos son los llamados MOEA por sus siglas en inglés *MultiObjective Evolutionary Algorithm*. Para un análisis más detallado se recomienda el trabajo de Deb (2001).

Lo que buscan es aproximarse al frente de Pareto y lograr mostrar una gama de diferentes compromisos entre las funciones a optimizar para luego poder tomar la decisión de cual elegir.

Hay dos operadores propios de los MOEA, estos son el operador de diversidad y el operador de asignación de fitness. El primero se aplica para evitar la convergencia a un sector en particular del frente de Pareto, el segundo intenta brindar mayor chance de perpetuar a los individuos con mejores características.

Se pueden clasificar por el método de asignación de fitness en:

- No basado en Pareto: Utilizan métodos sencillos de asignación de fitness. Son adecuados cuando el problema tiene no más de tres funciones objetivo. Un mecanismo popular es la combinación lineal de los objetivos.

Algoritmo 2 Algoritmo Evolutivo MultiObjetivo. En rojo se indican las diferencias con el algoritmo evolutivo genérico.

```
1: Inicializo( Pob(0))
2: generacion = 0
3: while No llegue al criterio de parada do
4:   Evaluar Pob(generacion)
5:   Operador Diversidad (Pob(generacion))
6:   Asignar Fitness (Pob(generacion))
7:   Padres = Seleccionar(Pob(generacion))
8:   Hijos = Cruzamiento(Padres) y Mutacion(Padres)
9:   NuevaPob = Reemplazar Pob(generacion) con Hijos
10:  generacion++
11: end while
12: return Frente de Pareto
```

- Basado en Pareto: Utiliza explícitamente la dominancia de Pareto al asignar el fitness.

2.5.3. Algoritmo evolutivo paralelo

Los problemas complejos suelen requerir una alta demanda computacional por lo que paralelizar el algoritmo evolutivo es útil para lograr tiempos de ejecución menores, pero no es el único objetivo que se puede conseguir, entre otros tenemos: encontrar soluciones alternativas al mismo problema, búsqueda más eficiente aún sin *hardware* paralelo, facilidad en la cooperación con otros métodos y búsqueda paralela de múltiples puntos en el espacio. (E. Alba, 2002).

Existen varios niveles de paralización ya sea a nivel global enfocándonos en paralizar la función fitness, a nivel de la población, o a nivel del individuo. (Nesmachnow, 2002) En el caso de los algoritmos genéticos gran parte del tiempo se ocupa en la etapa de evaluación, por esta razón es un buen método para distribuir la carga en varios procesadores para que las evaluaciones se realicen en paralelo.

Un modelo muy utilizado es el *maestro-esclavo*. El proceso maestro es el encargado de ejecutar los operadores básicos del algoritmo y distribuir a procesos esclavos la evaluación de la función fitness para un conjunto de individuos. El esclavo devuelve el resultado y luego el maestro es el encargado de continuar ejecutando los operadores. De este modo aumenta la eficiencia computacional del algoritmo ya que una de las funciones más costosas es distribuida entre varios nodos.

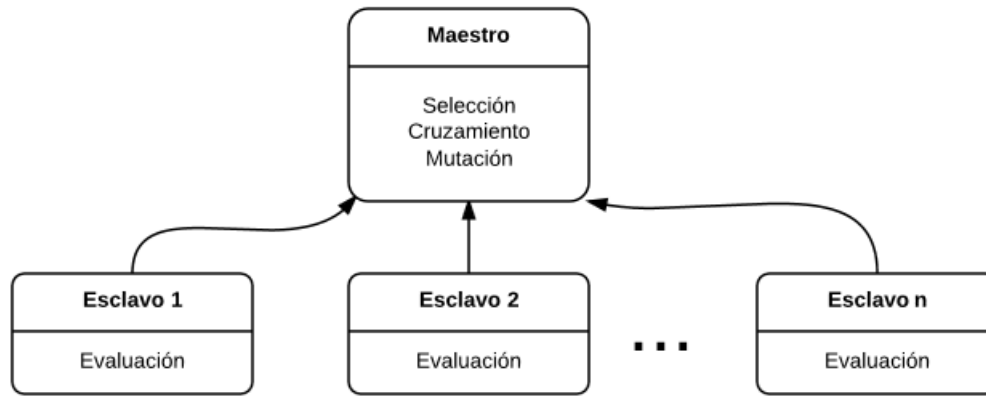


Figura 2.10: Modelo Maestro-Esclavo

2.5.4. Implementacion y Frameworks

A la hora de implementar un algoritmo genético es importante tener en cuenta ciertos aspectos que dotarán a la solución de una mayor flexibilidad, eficiencia y robustez.

El paradigma de orientación a objetos aporta múltiples ventajas entre las que se encuentra: reusabilidad del código, abstracción de problemas, modularidad y legibilidad. Aunque hay que tener en cuenta que esto puede ocasionar pérdidas de eficiencia computacional por lo que hay que balancear estos aspectos.

En el trabajo de Alba (1997) se indican con más detalles los elementos importantes de una implementación, entre ellas se destacan: no utilizar tamaño fijo para las poblaciones pues afectan la flexibilidad, evitar las múltiples evaluaciones sobre una misma solución, dar al usuario la posibilidad de extender las funcionalidades de manera modular, al implementar bibliotecas genéricas usar lenguajes orientado a objetos pues permite su extensión en forma sencilla.

Por estas razones se han desarrollado *frameworks* para trabajar en la resolución de problemas utilizando algoritmos evolutivos y otras técnicas heurísticas. Estos encapsulan de manera transparente al usuario los aspectos antes mencionados lo que permite un desarrollo más rápido, sencillo y seguro.

Existe una gran variedad de *frameworks*, a continuación se describen algunos de los más populares junto con sus principales características.

- JMetal: Es un *framework* orientado a objetos basado en java para la optimización de problemas multiobjetivo utilizando metatarsianas. Su arquitectura permite tanto experimentar con técnicas provistas o desarrolladas por el usuario. Entre sus características destacan que al ser en Java puede ser usado tanto en sistemas Windows como Linux. Posee una amplia variedad de algoritmos multiobjetivo listos para usar, y también algoritmos paralelos. Está en constante desarrollo y posee una documentación detallada. (JMetal, 2015)
- Galib: Es una librería escrita en c++ que incluye objetos y herramientas útiles para la resolución de problemas usando algoritmos genéticos. Es gratuita y de código abierto, pudiendo ser ejecutada tanto en Linux como en Windows. No tiene un desarrollo sostenido siendo su última actualización en el año 2000, esto no quita que todavía se siga usando por su sencillez y flexibilidad. (Galib, 1999)

- **Paradiseo:** Es un *framework* orientado a objetos que utiliza C++. Su objetivo es el diseño de metaheurísticas tanto paralelas como distribuidas. Cuenta tanto con algoritmos evolutivos, búsquedas locales y optimización basado en enjambres. Funciona tanto en plataformas Windows como Linux y posee varios módulos destinados a extender sus funcionalidades. Tiene una buena documentación y su ultima versión data del año 2012. Paradiseo (2010)
- **Open Beagle:** Es un *framework* en C++ utilizando algoritmos evolutivos. Brinda un entorno de alto nivel para trabajar con distintas técnicas, soportando programación evolutiva, algoritmos genéticos y estrategias evolutivas. Su arquitectura permite utilizar los principios de la programación orientada a objetos para lograr un código reusable y eficiente. Sus características apuntan a brindar un entorno amigable, eficiente, multi-plataforma y gratuito. (Open Beagle, 2012)
- **Mallba:** Es una biblioteca escrita en c++ que brinda esqueletos de algoritmos para la resolución de problemas de optimización tanto exactos, heurísticos como híbridos. Maneja el paralelismo de forma simple para el usuario. Posee una arquitectura flexible y extensible lo que permite agregar nuevos esqueletos de forma simple. No cuenta con documentación extensa pero si con varios ejemplos completos de implementaciones de los algoritmos. Funciona tanto en ambiente Linux como Windows, pero se dejó de actualizar en el año 2002 por lo que es posible que no funcione correctamente en entornos más modernos. (Mallba)
- **Malva:** Surge como un derivado de la biblioteca Mallba con modificaciones para ser ejecutado en ambientes actuales, por lo que cuenta con las mismas características aunque al estar en fase de desarrollo soporta solo algunos algoritmos entre ellos algoritmos genéticos. (Malva)

Los *frameworks* son una herramienta importante a la hora de desarrollar un algoritmo evolutivo. Si nos enfocamos en la sincronización de semáforos también serán necesarias otras utilidades entre las que se encuentra los simuladores de tráfico, los cuales serán explicados en la siguiente sección.

2.6. Simulación de tráfico

Los simuladores de tráfico son programas que simulan el movimiento del flujo vehicular sobre una red, cabe destacar que esta puede ser tanto terrestre, marítima o aérea. Son usados en proyectos de investigación, estudio de congestiones y análisis de impacto de obras. Existen varias razones para optar por esta herramienta, como es la rapidez en la obtención de resultados ya que la simulación se puede realizar en tiempos mucho más rápidos que en la realidad, el costo pues no es necesario cambiar la infraestructura para probar nuevos escenarios y es útil para prever situaciones que podrían darse bajo determinadas circunstancias.

Los simuladores se pueden dividir en dos grandes categorías, macroscópicos y microscópicos. En algunos casos se considera una tercera categoría híbrida de estas dos llamada mesoscópicos.

- **Macroscópicos:** El tráfico es modelado como un fluido continuo y es descrito de manera agregada usando características como la velocidad o densidad del flujo.

- Microscópicos: El tráfico se considera compuesto de partículas discretas. Cada una es actualizada según las propiedades de la red en ese momento, como límites de velocidad, vehículos cercanos y caminos a seguir. Utilizan un modelo de decisiones del conductor, esto permite crear una distribución heterogénea del comportamiento de los vehículos.
- Mesoscópicos: En general representa a los individuos con alto nivel de detalle pero sus interacciones y actividades con un bajo nivel de detalle. Por ejemplo agrupando vehículos en paquetes que se mueven por una red, considerándolos como una sola entidad.

En general se considera que las simulaciones microscópicas se acercan más a la realidad y que obtienen un nivel de granularidad mayor. Esto puede ser útil cuando se asignan propiedades sobre cada vehículo y se quiere observar el comportamiento cuando estas cambian. Esto no implica que se dejen de usar simulaciones macroscópicas pues aunque no poseen tanto detalle si son más rápidas y en determinadas circunstancias podrían ser una mejor opción.

En el trabajo de G. Kotusevski (2009) se puede encontrar detalles y descripción de varios simuladores entre los que se encuentran:

- SUMO: Simulador abierto, portable, microscópico diseñado para soportar grandes redes de tránsito. Es de los más populares, utiliza una serie de archivos de configuración para representar las rutas, los vehículos y el tráfico.
- QuadStone Paramics Modeller: Simulador modular y microscópico capaz de modelar un amplio rango de problemas de tránsito y transporte.
- Aimsun: Paquete de simulación que integra varios tipos de modelos de transporte, por ejemplo herramientas para el tráfico estático y un simulador microscópico
- Trafficware SimTraffic: Es un simulador que forma parte del paquete *Trafficware's Syncro Studio*, que cuenta con una herramienta para la sincronización de semáforos.
- Corsim Trafvu: Parte del paquete *Tsis Corsim*, presenta las animaciones y los gráficos estáticos para las redes de tráfico utilizando *Corsim* como entrada.

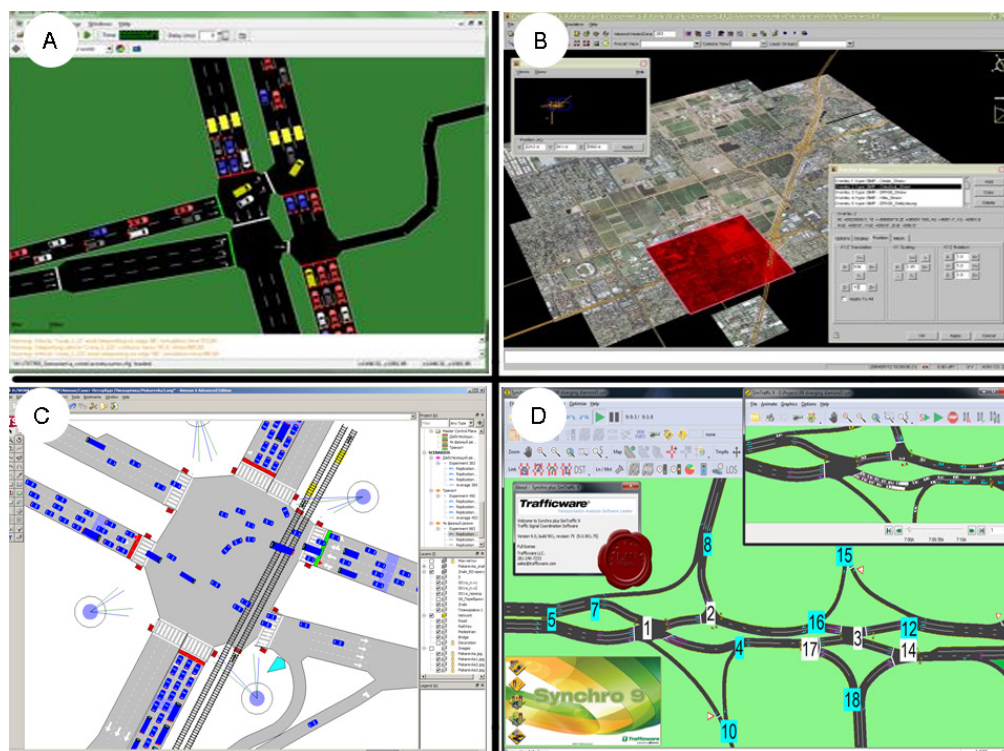


Figura 2.11: Algunos simuladores de tráfico. (A) Sumo, (B) QuadStone Paramics, (C) Aimsun, (D) Trafficware SimTraffic

Los simuladores requieren la creación de una *red de tránsito*, en general se refiere a las propiedades que tendrán los caminos, por ejemplo cantidad de carriles, limite de velocidad, ubicación, largo, conexiones entre las mismas, etc. Algunos simuladores obtienen esta entrada usando archivos de texto, lo cual puede ser un proceso lento y propenso a errores, otros pueden importar redes de diversas fuentes como OSM.

También necesitan conocer las *rutas seguidas por los vehículos*. Los simuladores pueden tomar esta información de manera explícita indicando para cada vehículo la ruta seguida o utilizar otros métodos dinámicos indicando solo los puntos de inicio y final del recorrido cuya ruta será generada en tiempo de simulación. Esto puede ser un proceso verdaderamente complejo por tal razón muchos simuladores poseen herramientas destinadas a facilitar esta tarea.

Un aspecto importante a tener en cuenta es la salida que genera el simulador, ya que es fundamental a la hora de sacar conclusiones. En general la información básica será la velocidad y tiempos de recorrido. Aunque también puede contener más detalle como: duración de detenciones, densidad de tráfico, uso de combustible o cantidad de emisiones contaminantes.

2.7. Trabajos relacionados

La investigación del estado del arte se realizó con dos objetivos en mente, el primero analizar las distintas soluciones que existen actualmente para el problema y segundo encontrar nuevas prácticas, algoritmos o utilidades que pudieran fortalecer la solución.

El problema del tráfico optimizando las luces de los semáforos se puede resolver por

diferentes métodos como redes neuronales (López et al., 1999), lógica difusa (G. Y. Lim y Hong, 2001), redes de petri (DiFebbraro et al., 2002), etc; por lo tanto la cantidad de soluciones encontradas fue abundante y variada, por esto se decidió enfocarse en soluciones cercanas a la propuesta y en otras que tuvieran alguna particularidad interesante para destacar.

- J. Sánchez, M. Galán, y E. Rubio. Genetic algorithms and cellular automata: A new architecture for traffic light cycles optimization. 2004

Este trabajo se basa en tres puntos: El uso de algoritmos genéticos para la optimización, simulación de autómatas celulares para la función de evaluación del tráfico y un cluster para realizar ejecuciones en paralelo. El modelo es pequeño con 5 calles de 2 vías que se intersectan. La codificación del cromosoma es un vector de números enteros, donde se codifica para cada intersección cual calle está habilitada en cada ciclo. Usa una estrategia de selección elitista donde los dos mejores se clonan a la siguiente generación y el resto es generado por cruzamiento de dos puntos.

Para la evaluación se utiliza el tiempo que transcurre desde el momento que un vehículo entra en la red hasta que sale. Se utilizó un cluster y programación paralela con una estrategia maestro-esclavo, el maestro envía los cromosomas a los esclavos que evalúan y devuelven el resultado, luego el maestro se encarga de generar la siguiente población.

Se compararon los resultados con una simulación aleatoria y con una fija, obteniendo la solución propuesta mejores resultados en todos los casos evaluados.

Este mismo grupo realizó trabajos similares expandiendo esta investigación, que se presentan a continuación.

- J. Sánchez, M. Galán, y E. Rubio. Applying a traffic lights evolutionary optimization technique to a real case: “Las Ramblas” Area in Santa Cruz de Tenerife. 2008 Lo interesante de este estudio es que se aplica lo expuesto en el trabajo anterior a un lugar real en Santa Cruz de Tenerife para validar los resultados. Algunas mejoras que se introdujeron fueron que el cromosoma se codifica utilizando código Gray lo que dicen mejora el rendimiento en mutación y cruzamiento. La población inicial esta compuesta por nueve *soluciones* provistas por la alcaldía de la ciudad. Tanto la estrategia de selección como de cruzamiento y mutación es similar al anterior trabajo.

El modelo se discretizó en 42 semáforos, 26 entradas y 20 salidas. Las soluciones provistas por la alcaldía se simularon y se utilizó para comparar con los resultados obtenidos por el algoritmo que en términos generales logra una mejora de hasta 26 %.

- J. Sánchez, M. Galán, y E. Rubio. Traffic signal optimization in “La Almozara” District in Saragossa under congestion conditions, using genetic algorithms, traffic microsimulation, and cluster computing. 2010 Este trabajo es similar al anterior pero se destacan algunos cambios, por ejemplo se probaron cuatro funciones de fitness diferentes, ellas fueron: cantidad de vehículos que llegaron a destino, tiempo de viaje promedio, tiempo de ocupación promedio y velocidad promedio global. También agrega medidas correspondientes al gas total emitido por los vehículos que tiene relación con la velocidad a la que van. El modelo discretizado de la zona

de *La Almozara* cuenta con 17 semáforos, 7 intersecciones, 16 entradas y 18 salidas. Se simuló tanto un caso standard como casos de alta congestión de tráfico, las comparaciones se hacen respecto a las distintas funciones de fitness y los distintos escenarios planteados logrando buenos resultados.

- J. Penner, R. Hoar, y C. Jacob. Swarm-based traffic simulation with evolutionary traffic light adaptation. 2002 Este trabajo se centra en un modelo de simulación basado en enjambres que luego se optimiza utilizando un algoritmo genético cuya función de fitness es el tiempo promedio de los vehículos dentro de la red. El cromosoma cuenta con la secuencia y duración de los semáforos, así como la relación con los semáforos complementarios, la mutación tiene en cuenta esto para que no ocurra en una misma intersección dos luces verdes. El cruzamiento se hace entre los distintos semáforos con una probabilidad más alta si esta en la misma intersección.

El primer escenario es pequeño, cuenta con una ruta de 3 carriles y 3 intersecciones. Con diferentes variaciones logra mejoras significativas.

Luego se realiza otro escenario más complejo de 28 semáforos y 9 intersecciones logrando mejoras de hasta 26 %.

- D. H. Stolfi. Optimización del tráfico rodado en ciudades inteligentes. 2012 Este trabajo se basa en el concepto de una ciudad inteligente enfocado en la movilidad, indica que los atascos del tráfico provocan tanto pérdidas económicas como también contaminación ambiental.

Utiliza un algoritmo inteligente que tomando en cuenta el estado de congestión de las rutas sugiere al usuario cual es la ruta más rápida a su destino, utilizando un dispositivo en el automóvil que se enlazara por *wifi* con los semáforos que cuentan con sensores. Por lo tanto el trabajo no se basa en la optimización de las señales de los semáforos existentes sino agrega encima de esto un sistema de búsqueda de mejor ruta.

Para el modelo utiliza una zona de la ciudad de Málaga, cuenta con 8 entradas y 8 salidas, para la simulación utiliza SUMO. Los vehículos modelados son: turismo, monovolumen, furgoneta y camión donde se varía la longitud, velocidad y probabilidad que entre en la red de tráfico.

Se intenta minimizar los tiempo de viaje de los vehículos que circulan por la red. Para ellos se utiliza un algoritmo genético cuya estrategia de selección consiste en tomar los dos peores individuos reemplazándolos por los dos mejores hijos encontrados. En el cromosoma se representa cada sensor, con los destinos y rutas posibles. La función de fitness tiene en cuenta la cantidad de viajes completados durante el tiempo de ejecución, el tiempo medio utilizado y el retraso medio. Se prueban varias estrategias de cruzamiento y mutación. Las ejecuciones tienen un tiempo fijo de duración.

Compara el resultado con una simulación donde se generaron 64 itinerarios diferentes, esto se prueba en 3 escenarios. Las simulaciones se realiza hasta con 800 vehículos, concluyendo que al aumentar la cantidad de vehículos (más de 400) en el sistema la solución mejora sustancialmente el resultado base.

- K. T. K. Teo, W. Y. Kow, y Y. K. Chin. Optimization of traffic flow within an urban traffic light intersection with genetic algorithm. 2010 Este trabajo presenta

un modelo simple con una sola intersección en donde se intenta optimizar los tiempos de los semáforos para lograr mejorar rendimiento del tráfico. El cromosoma representa los tiempos de la luces verdes mientras que la función de fitness es el largo de las colas generadas. Un aspecto interesante es que la simulación tiene un tiempo fijo de 600 segundos por generación pero no se detalla el tipo de simulación utilizada. Las conclusiones indican que la optimización usando algoritmos genéticos es buena para el problema del flujo de tráfico.

- D. J. Montana y S. Czerwinski. Evolving control laws for a network of traffic signals. 1996 Esta propuesta utiliza un enfoque adaptativo con sensores que analizan el tráfico en tiempo real. Un sensor para saber cuantos autos pasan y otro para saber qué tan larga es la cola. Considera los cambios que se producen con respecto al caso promedio y cambia los tiempos de las señales en forma acorde. La premisa se basa en la inteligencia colectiva en donde agentes individuales realizan tareas simples que al interactuar producen resultados globales.

Se aplica programación genética más específicamente STGP (strongly typed genetic programming) (Montana, 1995) que aprende el árbol de decisión que será ejecutado por todas las intersecciones cuando decida el cambio de fase. Además un algoritmo genético híbrido busca diferentes constantes que serán usadas en los árboles de decisión mejorando el flujo de tráfico.

La medida básica de efectividad en la función de evaluación es el *Delay*, esto es el total de tiempo perdido por causa de las señales de tráfico. Se probaron tres modelos distintos de cuatro intersecciones con una versión especial del simulador TRAF-NETSIM (Rathi, 1990)

El experimento arroja buenos resultados en cuando a la performance de la red y destaca la buena adaptabilidad en diferentes circunstancias. Aunque se marca el hecho de que el modelo es simple y de tamaño pequeño, siendo una incógnita como funcionará con problemas más complejos.

- A. Vogel, C. Goerick, y W. von Seelen. Evolutionary algorithms for optimizing traffic signal operation. 2000

La solución utiliza un enfoque auto-adaptable para mejorar el tráfico tanto en el corto como en el largo plazo a través de la optimización de las señales de tráfico en las intersecciones de una red de rutas. Al darle dinamismo a cada intersección se mejora el rendimiento de la red.

Destaca el hecho que dada una configuración de semáforos aún siendo optimizada usando simulaciones es difícil que sea la mejor en todas las situaciones o en casos extremos (horas picos). Para solucionar esto proponen un sistema auto-adaptable que toma la información del tráfico actual usando detectores de vehículos y espacios.

Utiliza el concepto de fases para representar las distintas posibilidades en la señalización de la intersección y cuanto tiempo debe permanecer en esa fase. Propone el desarrollo de un algoritmo evolutivo donde cada individuo representa un sistema de fases mientras el fitness se obtiene simulando ese sistema en un modelo de tráfico. Este es relativamente pequeño con una intersección con cuatro brazos, cada uno con tres líneas donde la ruta principal tiene el doble de densidad vehicular.

Los resultados indican que la ventaja de usar conocimiento experto para configurar los parámetros iniciales es mínimo ya que llega muy rápido a resultados similares.

Tanto la búsqueda de los mejores parámetros como en estructuras más simples el algoritmo se comporta con buenos resultados.

- N. M. Rouphail, B. B. Park, y J. Sacks. Direct signal timing optimization: Strategy development and results. 2000

Se estudia una pequeña red de tráfico de nueve intersecciones con semáforos en la ciudad de Chicago, contando con tráfico de vehículos, parking, rutas de ómnibus y paradas. Se toman valores reales en horas pico, comprobando que las colas que se generan en la simulación coinciden con la realidad. Usa el programa (TRANSYT-7F) que permite visualizar mapas y contiene optimización de varios algoritmos genéticos y (CORSIM) un simulador de tráfico comercial. Se probaron 12 estrategias distintas de resolución midiendo el tiempo de demora en la red y el largo de las colas producidas. Los resultados indican que la performance de la red aumentó considerablemente usando este método.

2.7.1. Resumen

Aquí un breve repaso sobre los trabajos evaluados y su comparación con la propuesta presentada.

El trabajo de Sánchez et al. (2004) posee algunos puntos de contacto como es la ejecución paralela en un cluster y la arquitectura maestro-esclavo. La principal diferencia es que el escenario que evalúan es pequeño y no se compara con un escenario real.

El siguiente trabajo de Sánchez et al. (2008) expande lo anterior y lo utiliza en un caso real en Santa Cruz de Tenerife siendo de una complejidad similar a Garzón en términos de cantidad de cruces y semáforos. Los resultados obtenidos son muy positivos obteniendo mejoras de hasta 26 %.

Se destaca de Sánchez et al. (2010) las pruebas de diferentes funciones de fitness teniendo en cuenta diversos factores como tiempo de viaje o velocidad promedio. Este trabajo inspiró la realización de una función multiobjetivo que tuviera en cuenta la velocidad promedio en el proyecto actual.

Aunque Stolfi (2012) no optimiza la configuración de los semáforos, si plantea una posibilidad interesante para mejorar el tráfico en una ciudad indicando a los vehículos la mejor ruta por lo que se podría tomar como un elemento en trabajos futuros.

Tanto los trabajos de Teo et al. (2010) como Stolfi (2012) plantean la simulación con un tiempo fijo lo que se utilizó en el proyecto.

Montana y Czerwinski (1996) y Vogel et al. (2000) proponen algoritmos que se adapten en tiempo real por lo que se destacan como posibles trabajos a futuro. Es digno de mención que todos los trabajos consultados lograron mejoras significativas en sus resultados.

En conclusión el estudio de los trabajos relacionados permitió conocer en profundidad distintas soluciones y métodos que fueron tenidos en cuenta en menor o mayor medida en la solución propuesta. El hecho de que se obtuvieran buenos resultados motivo aún más el desarrollo del trabajo presentado.

Capítulo 3

Estrategia de resolución

En este capítulo se explica el proceso llevado a cabo para desarrollar la solución. Se presenta el modelado básico del problema que consiste en un mapa de la zona con todos los datos necesarios para realizar la simulación y el algoritmo genético utilizado con su estructura, parámetros y configuración. Se detalla la biblioteca utilizada para el desarrollo del algoritmo genético y la arquitectura propuesta.

La metodología se basa en cuatro puntos que serán tratados a continuación estos son:

- Modelado del problema.
- Algoritmo genético multiobjetivo y paralelo.
- Simulador de tráfico.
- Cluster Fing para la ejecución del algoritmo.

3.1. Modelado del problema

Para solucionar el problema se usarán simulaciones de la realidad, por tanto es importante contar con un modelo detallado y fidedigno. A continuación se da información sobre el simulador a utilizar, las herramientas necesarias y el proceso seguido para generar el modelo.

3.1.1. Simulador SUMO (Simulation of Urban MObility)

Como se explicó en el marco teórico SUMO es un simulador de tráfico gratis y abierto que nos permite modelar redes de calles, vehículos, transporte público, ciudadanos y semáforos (SUMO). Sigue un modelo microscópico ya que realiza la simulación individual explícita de cada elemento. Incluye un conjunto de herramientas destinadas a facilitar la generación de tráfico y la construcción de mapas.

Dado que existe un amplio abanico de posibilidades a la hora de elegir un simulador se realizó un análisis relacionado a las posibilidades y objetivos del proyecto, a continuación se detallan las razones que sustentan la elección de SUMO como el simulador utilizado:

- Portable: SUMO puede ser ejecutado tanto en Windows como en Linux, esto es importante dado que son las plataformas en las que se desarrolla el proyecto, además el Cluster Fing utiliza el sistema operativo CentOS Linux) y era un requisito que pudiera ser ejecutado en este ambiente.

- Tipos de ejecución: Permite las opciones de ejecutarse sin interfaz gráfica utilizando la línea de comando lo que aumenta sensiblemente la velocidad de ejecución, además esto es fundamental a la hora de realizar la arquitectura necesaria ya que el programa tiene que tener la posibilidad de ejecutar el simulador de manera directa. Por otro lado también tiene la opción de mostrar la interfaz gráfica lo cual es indispensable a la hora de visualizar la simulación sobre todo en los primeros momentos del desarrollo en los cuales se realizan ajustes y pruebas.
- Gratis y abierto: SUMO es de código abierto y sin costo, el cual es un factor importante para un proyecto de investigación como el que se quiere desarrollar.
- Documentación y mantenimiento: Cuenta con una detallada documentación lo cual hace más fácil su utilización, así como una comunidad muy activa que responden dudas en foros lo que es útil a la hora de buscar soporte si ocurriera algún problema o se detectara un error. También cuenta con un desarrollo activo lo cual es importante pues se realizan correcciones y actualizaciones frecuentemente.
- Configuración simple: Tiene un sistema sencillo para configurar las simulaciones basada en archivos XML, de esta forma se pueden modificar la configuración de los semáforos, las propiedades de los vehículos, las rutas que estos siguen entre otras opciones. Además tiene herramientas para poder utilizar mapas importados de servicios como OSM.
- Información de salida: SUMO tiene la opción de generar una amplia gama de datos producidos por la simulación entre los que se encuentran la velocidad de los vehículos y el largo del recorrido que son requeridas por la solución propuesta.
- Eficiente: Soporta redes de tránsito muy grandes y está diseñado para ejecutar simulaciones a gran velocidad (Sumo Features, 2014). Lo cual es una característica deseable por la complejidad del problema a solucionar.

SUMO tiene un funcionamiento sencillo basado en tomar como entradas archivos de configuración que representan la red vial, los vehículos, el tráfico y los semáforos. Y archivos de salida con información interesante como el tiempo de simulación, la cantidad de vehículos, sus velocidades, duración del viaje, emisiones de gases contaminantes, etc.

Algunas otras herramientas relacionadas a la simulación:

- NetConvert: Utilizado para la generación de la red a partir de un mapa. Por ejemplo podemos transformar un mapa de Open Street Map en archivo XML de red que SUMO reconoce. Este programa viene integrado con SUMO.
- DUaRouter: Genera recorridos de vehículos basado en dinámicas definidas por el usuario. Esta utilidad viene integrada con SUMO.
- Traffic Modeler: Herramienta para la generación de tráfico de manera visual y luego exportarlo para que sea reconocido por SUMO. (Papaleontiou)

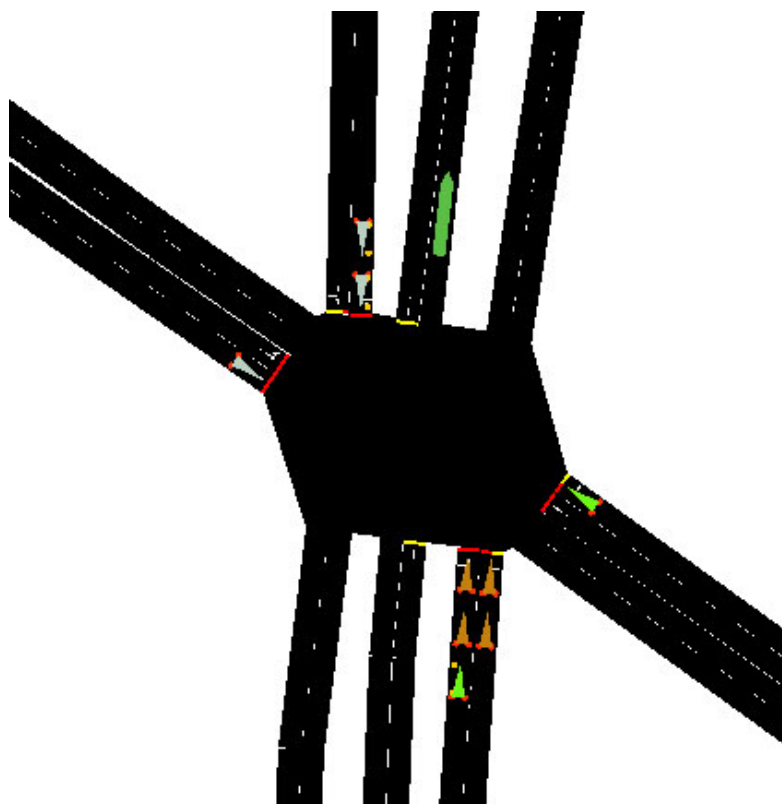


Figura 3.1: Simulación de tráfico en SUMO en el cruce entre Bulevar Battle y Ordoñez y el Corredor Garzón.

3.1.2. Proceso del modelado

Se describen los pasos realizados para tener los elementos necesarios para realizar la simulación.

Diseño del mapa

El primer paso consiste en desarrollar un mapa de la zona que sea compatible con el simulador. Para ello se utiliza el servicio de Open Street Map (OSM) que cuenta con mapas libres y actualizados por una comunidad muy activa. Se importa la zona de interés del mapa al editor JOSM (Java OpenStreetMap Editor) para poder adecuarlo a las necesidades del problema.

El alcance que se pretende es la zona que corresponde al Corredor Garzón desde su inicio hasta el final y dos caminos paralelas a cada lado. Como se ve en el mapa no existen calles paralelas reales por lo que se eligieron primero las calles que corresponderían a las paralelas y todas las calles que permiten ir de una de las calles paralelas a otra, chequeando que cada paralela se constituya por una calle doble mano o dos calles de una sola mano y luego se borraron manualmente todas las demás calles.

Al notar que habían calles de una sola mano que estaban representadas en Open Street Map como doble vías y algunos cruces de Garzón como Lezica, diferían con lo visto in situ, se modificaron los datos importados. Se utilizaron otros servicios como Google Maps y Bing Maps como consulta ya que al poseer mapas y fotos actualizadas del lugar

se podía discernir y recordar de como eran exactamente las calles en la actualidad. Como el paso previo fue la eliminación de las calles que no fueran las paralelas, no se podían subir los cambios realizados (porque desaparecerían calles que realmente existen) y por este motivo no se pudo ayudar a la comunidad actualizando el mapa de OSM.

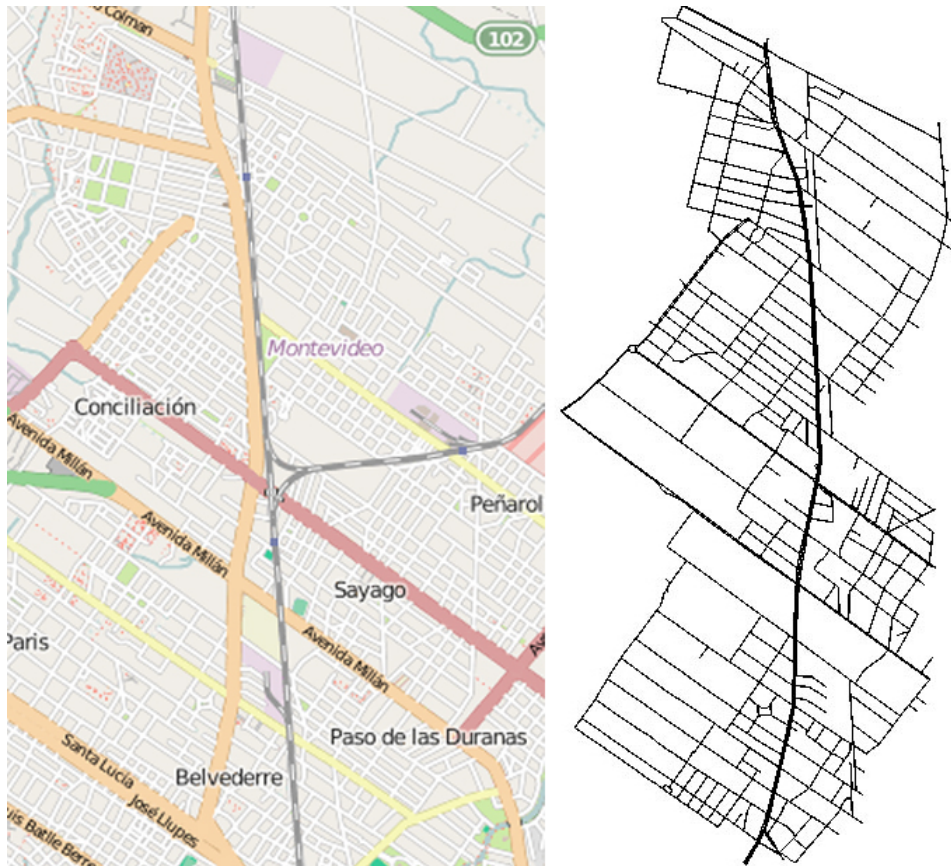


Figura 3.2: A la izquierda el mapa extraído de OSM, a la derecha el mapa procesado listo para ser usado en SUMO. El corredor Garzón está en el centro de cada imagen.

Se utilizó la herramienta Netconvert para transformar el formato OSM al formato XML que SUMO maneja, Netconvert no reconoce muchos de los datos aportados por el formato OSM como los números de las casas, las vías del tren, las vías de peatones, los caminos, las plazas, las paradas, los separadores que tiene el corredor de las vías de autos, entre muchos otros. Pero lo mas importante es que no funciona correctamente para reconocer corredores por lo que mezclaba y superponía el corredor central con las vías de los autos, esto seguramente por no reconocer los separadores físicos que tiene el corredor.

Primero se filtraron y borraron todos los datos que no eran reconocidos por NetConvert mediante la eliminación de elementos por etiquetas que permite el jOSM. Luego se separaron aproximadamente un metro las calles de él corredor central. Si bien esto logró que NetConvert interpretara que no era posible cambiar entre la vía de los autos y la del corredor de ómnibus, también generó un error ya que cada cruce de la realidad era tratado como tres cruces distintos (uno por cada calle del corredor).

Finalmente se realizaron varios ajustes confeccionando manualmente archivos xml

para que lo generado por el NetConvert corrigiera todos los errores que genera por defecto. Los distintos cruces con múltiples semáforos antes mencionado se maneja con la unión de nodos y la falta de las prohibiciones de los virajes a la izquierda que presentaba se corrigió con un archivo de las conexiones posibles.

Siguiendo estos pasos se obtuvo un mapa fiel a la realidad y compatible con el simulador.

Trabajo de campo

Se cuentan con los datos públicos sobre la cantidad de ómnibus y sus frecuencias pero no se tienen datos sobre la densidad de tráfico vehicular en la zona, por esto se realiza un revelamiento in-situ con las siguientes características.

Se seleccionaron cinco cruces que presentan diferentes características para poder modelar variantes en la cantidad de vehículos circulantes. Estos son: Camino Ariel, Battle y Ordoñez, Plaza Videla, Camino Colman y Aparicio Saravia.

Se siguen las recomendaciones de los textos consultados al respecto (CTRE, 2002). Se eligió el día miércoles, que estuviera soleado y entre las 15 y 17 horas para no tener los sesgos que se producen los fines de semana o días de lluvia. Se realizaron filmaciones de entre 15 y 30 minutos en los cruces y luego se analizaron los vídeos para realizar el conteo manual con la posibilidad de enlentecer el vídeo para mayor facilidad. Luego se completa una planilla electrónica donde se tiene la información de vehículos que recorren Garzón, la calle que cruza y los que doblan.

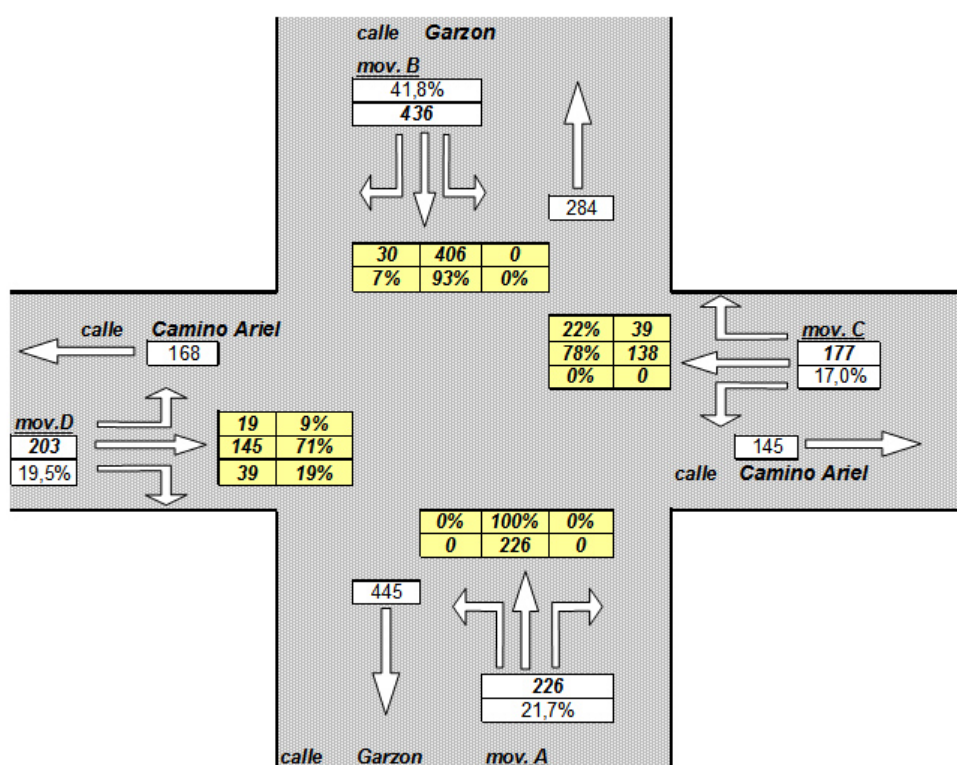


Figura 3.3: Ejemplo de planilla electrónica para el conteo manual en Camino Ariel

Además se realizaron recorridas de punta a punta del corredor a una velocidad cons-

Cuadro 3.1: Resumen del revelamiento del tráfico en la zona del corredor Garzón. Se muestra la cantidad de vehículo y la orientación hacia donde circulan.

Intersección	Sur-Garzón	Norte-Garzón	Oeste	Este
Camino Colman	410	390	140	230
Plaza Vidiella	400	444	292	0
Aparicio Saravia	390	450	40	90
Battle y Ordoñez	510	390	470	300
Camino Ariel	436	226	177	203

tante en auto para verificar los tiempos obtenidos en la simulación.

Para obtener la configuración de los semáforos se realizó un recorrido en bicicleta por el corredor cronometrando la duración del tiempo en cada esquina de cada semáforo. Tanto de ida como de vuelta para corroborar que fueran correctos. Estos tiempos fueron verificados por los vídeos obtenidos.

Modelo del tráfico

Una vez que se tiene el mapa compatible con el simulador y los datos relevados de la realidad se agrega el tráfico a la simulación.

Existen varios modelos disponibles para la representación de la circulación de vehículos, aquí exponemos algunos de los más populares.

- Aleatorios: Genera diferentes recorridos que seguirán los vehículos aleatoriamente
- Basado en áreas: Se especifican áreas como un conjunto de calles y se realizan recorridos entre ellas.
- Basado en actividad: Se especifica la cantidad de casas, vehículos y población en un determinado lugar y el modelo genera la densidad de tráfico que se producirá basado en los tipos de actividades que se realizan comúnmente como ir al trabajo, hacer las compras, ir a la escuela, etc
- Definido por el usuario: permiten determinar la ruta de los vehículos con mayor detalle.

Se utilizó el programa Traffic Modeler (Papaleontiou) que sirve para generar modelos de tráfico complejos de manera visual. Se optó por un modelo de movilidad entre áreas lo que permite una buena granularidad al especificar la densidad de tráfico. Esto genera el recorrido del viaje para cada vehículo, estos se mantienen constantes en las distintas ejecuciones del algoritmo. Lo que cambia son las velocidades desarrolladas por cada uno ya que dependiendo de la configuración de los semáforos logrará mayores o menores velocidades.

Se manejaron dos tipos de vehículos autos y ómnibus cada uno con características distintas tanto de tamaño, aceleración y velocidad máxima. No se especifican otros tipos de vehículos como motos o camiones ya que el trabajo se enfoca en los dos primeros tipos.



Figura 3.4: Mapa del TrafficModeler con las áreas de tráfico. Círculos del mismo color indican tráfico especificado entre esas áreas

Se agregaron las frecuencias y los distintos recorridos de los ómnibus obtenidos de datos públicos de la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) Estos incluyen las líneas urbanas 'G', '409', '2', 'd5' y '148'.

Las líneas de ómnibus suburbanas realizan un mismo trayecto y se generalizan con el nombre 'A' las cuales no van a ser tomadas en cuenta en la optimización del algoritmo pero si aparecerán en la simulación.

La ubicación y líneas de cada parada se obtuvo de (SIG IMM), existen 14 paradas para líneas urbanas por el corredor para el recorrido de ida y las mismas para la vuelta. Para los recorridos se hicieron variantes en los viajes dentro de una misma línea para simular el hecho de que no siempre se para en las mismas paradas.

También se tuvo en cuenta para la simulación el tiempo que demora un ómnibus al detenerse en una parada, y que hay algunas donde por la cantidad de gente se demora más. Estos datos fueron obtenidos en el lugar considerando tiempos de entre 15 a 35 segundos.

Se realizó un estudio basado en datos de GPS proporcionados por la IMM luego de reuniones con Ingeniería de Tránsito. Estos datos cuentan con la posición exacta en coordenadas geográficas, la velocidad instantánea y la referencia del ómnibus para un conjunto de líneas seleccionadas tomadas en un período de una semana. Para este

procesamiento fue necesario utilizar QGIS, un sistema de información geográfico capaz de visualizar, editar y realizar operaciones sobre elementos geográficos. Y algunos *scripts* para obtener las estadísticas necesarias ya que la cantidad de información estudiada era muy grande (1.5Gb). Esto permitió seleccionar, filtrar y relacionar los datos de posición y velocidad con las líneas seleccionadas que circulan por el Corredor Garzón. Luego de procesar los datos se obtuvo una velocidad media es de 14.5 km/h lo que permite ajustar mejor el modelo.

Para introducir estos datos en el simulador se utilizan tres archivos de configuración en formato xml que son tomados como entrada, estos son:

- Semáforos: Cuenta con la información detallada de la duración de los semáforos, el comienzo de su fase y la ubicación del mismo respecto al mapa base.
- Rutas de vehículos: Se indica la ruta de cada vehículo que recorrerá el mapa.
- Recorrido de ómnibus: Indica las rutas de los ómnibus, la frecuencia, la ubicación de las paradas, en cuales se detiene y cuanto demora.

3.2. Arquitectura de la solución

En la figura 3.5 se muestra la arquitectura propuesta para el problema.

La biblioteca Malva se utiliza para la implementación del algoritmo, en cada evaluación de la función de fitness se realiza un llamado al simulador SUMO.

En el primer paso el algoritmo genera la población inicial, estos individuos representan una configuración de semáforos para el Corredor con el tiempo de duración de las luces y las fases. Esta población se genera realizando algunas variaciones de los valores reales obtenidos.

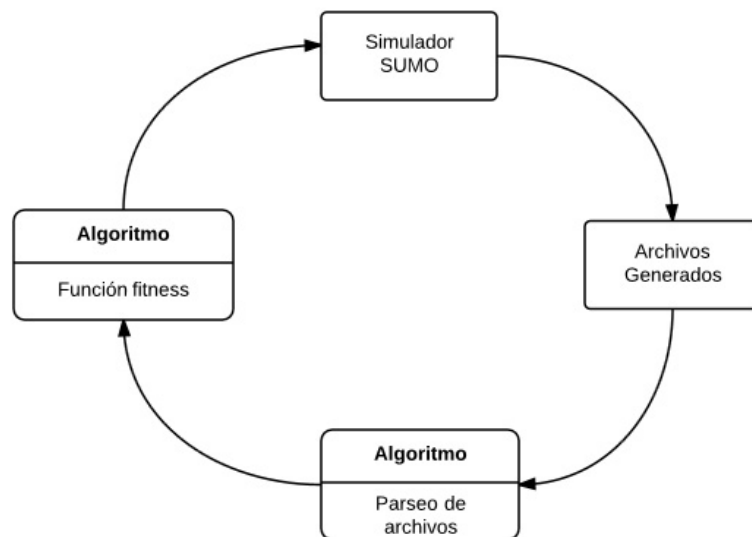


Figura 3.5: Arquitectura de la función de fitness

Luego por cada individuo se genera un archivo compatible con el simulador que representa la configuración de semáforos. Este archivo se utiliza como entrada para ejecutar

el simulador para cada individuo. Al finalizar la ejecución se generan archivos de salida que son procesados por el algoritmo, estos tienen la información necesaria para calcular el fitness de cada individuo como la velocidad media de ómnibus y otros vehículos.

El algoritmo se detiene al alcanzar un número de generaciones determinado en ese momento se crea un archivo que tiene la mejor configuración de semáforos encontrada.

3.3. Implementación: Biblioteca Malva

Dada la complejidad del problema se tuvo en cuenta desde un primer momento la utilización de un *framework*, de esta forma se podría lograr una ejecución eficiente y una implementación robusta pero flexible.

Como se detalló en el marco teórico existen varias opciones de *frameworks* disponibles. Por las particularidades del problema existen ciertos requerimientos a la hora de seleccionar uno para su resolución, entre los que se destacan:

- Abierto y gratuito: Al ser un proyecto de investigación de índole académico es conveniente que no se tengan costos económicos asociados. Además es importante que se cuente con el código abierto con el fin de introducir modificaciones en el código base o corregir errores.
- Algoritmo genético: El framework debe facilitar el desarrollo de un algoritmo genético ya que es la base en la que se sustenta el proyecto.
- Algoritmo paralelo: Por la complejidad del problema y el alto consumo de recursos computacionales que insume es fundamental la opción de ejecución en paralelo. Si no cuenta con funcionalidad nativa al menos que tenga la posibilidad de modificar el código principal para agregarlo.
- Plataforma: Es requerido que se pueda ejecutar en el Cluster Fing (CentOs - Linux), en Windows y otros sistemas Linux, ya que son las plataformas en donde se desarrollará el trabajo.
- Confiabilidad: Es deseable que sea lo suficientemente estable como para tener confianza de que el algoritmo funcionará sin demasiados problemas de manera correcta. Por ejemplo que existan casos de éxito usando el *framework*, documentación, ejemplos de código, etc.
- Lenguaje: Es deseable que esté desarrollado en c++ o java por la experiencia que se cuenta en estos lenguajes.
- Multiobjetivo: Es deseable (aunque no requerido) que soporte algoritmos multiobjetivo, ya que la función que se quiere implementar aún siendo multiobjetivo es sencilla.

Luego de analizar todos estos puntos se selecciona la biblioteca Malva para la implementación del algoritmo. A continuación se detalla su funcionamiento y características.

Como se explicó anteriormente Malva surge como una variante del proyecto Mallba. Propone su actualización, mejora y desarrollo como un proyecto de código abierto colaborativo. Su objetivo es proveer de varios esqueletos de heurísticas de optimización que puedan ser utilizados y extendidos de manera fácil y eficiente.

Los esqueletos se basan en separar dos conceptos: El problema concreto que se quiere resolver y por otro lado el método utilizado para resolverlo. Por tanto un esqueleto se puede ver como una plantilla genérica que se instancia para resolver un problema particular, manteniendo todas las funcionalidades genéricas.

Utiliza el lenguaje c++ dado su alto nivel, modularidad y flexibilidad. Los esqueletos se ofrecen como un conjunto de clases requeridas que son las que el usuario deberá modificar para adaptarlo a su problema y las provistas que incluyen todos los aspectos internos del esqueleto y son independientes del problema particular. Entre los algoritmos provistos se encuentra el de Algoritmos genéticos y CHC.

3.4. Especificación del Algoritmo Genético utilizado

Se utiliza el algoritmo genético provisto por la biblioteca Malva llamado NewGA al cual se le realizan algunas modificaciones para lograr su ejecución en paralelo, con el objetivo de reducir los tiempos de ejecución del algoritmo ya que los escenarios planteados se consideran complejos y que insumirán una gran carga de recursos computacionales.

Se utiliza el método maestro-esclavo donde el maestro se encarga de la mayoría de las funciones:

- Inicialización de la población.
- Distribuir la evaluación de los individuos hacia los esclavos creando un hilo por cada esclavo .
- Obtener de los esclavos los valores obtenidos de fitness.
- Selección de los mejores individuos.
- Aplicación de operadores de cruzamiento y mutación.
- Reemplazo y generación de la siguiente población.

Mientras los esclavos se encargan solamente de lo siguiente:

- Obtener el individuo enviado por el maestro.
- Ejecutar la evaluación del individuo que corresponde a ejecutar el simulador y obtener los datos de salida.

El siguiente esquema muestra el algoritmo utilizado.

Algoritmo 3 Algoritmo Genético de Malva.

```

1:  $t = 0$ 
2: Inicializo(  $P(t)$ )
3: Evaluar estructuras en (  $P(t)$ )
4: while No termine do
5:    $t++$ 
6:   Seleccionar  $C(t)$  de  $P(t-1)$ 
7:   Recombinar estructuras en  $C(t)$  formando  $C'(t)$ 
8:   Mutar estructuras en  $C'(t)$  formando  $C''(t)$ 
9:   Evaluar estructuras en  $C''(t)$  generando un hilo de ejecución por cada una
10:  Consolidar valores de la evaluación
11:  Reemplazar  $P(t)$  de  $C''(t)$  y  $P(t-1)$ 
12: end while

```

A continuación se realiza un resumen de las características del algoritmo implementado, que en la siguiente sección serán tratados en mayor detalle:

- Algoritmo paralelo: Utiliza el método maestro-esclavo para que en cada iteración el maestro genere un hilo para cada ejecución de la función fitness y luego espere a la terminación de todos los hilos para consolidar los datos.
- Función Multiobjetivo: Se intenta optimizar tanto la velocidad promedio de vehículos como de ómnibus teniendo cada uno un peso específico.
- Representación del cromosoma: Es un vector de números reales que representan los tiempos de los semáforos y sus fases.
- Cruzamiento y mutación: Se utiliza una variante del cruzamiento de un punto específico para el problema al igual que para la mutación.
- Selección y reemplazo: Reemplaza padres por hijos, la selección de los padres se realiza por el método de torneo de tres individuos y la selección de hijos por el método de ruleta.

3.4.1. Representación del cromosoma

Como se explicó en el marco teórico el problema de sincronización de semáforos puede ser resuelto optimizando diferentes parámetros, entre ellos la duración de fase, de ciclo y el *offset*. Dependiendo de cuales se elijan tendrán que tener su representación en el cromosoma.

Para la solución propuesta se contempla tanto la fase como el *offset*. El cromosoma se va a agrupar lógicamente en cruces siendo el valor de cada gen el tiempo que demora una fase de un cruce y se agrega para cada cruce el *offset*. Se utiliza un vector de números naturales por claridad en el desarrollo y facilidad a la hora de aplicar los operadores. Por tanto el tamaño del cromosoma depende tanto de la cantidad de cruces como de la cantidad de fases de cada uno. Esto significa que se busca realizar la optimización en forma global para todo el sistema y no individualmente para cada cruce. Esto es fundamental pues se busca mejorar la velocidad promedio del Corredor Garzón pero que esto no afecte al resto de las calles de la zona.

En la representación se omiten las luces amarillas ya que no modifican los tiempos reales del paso de vehículos.

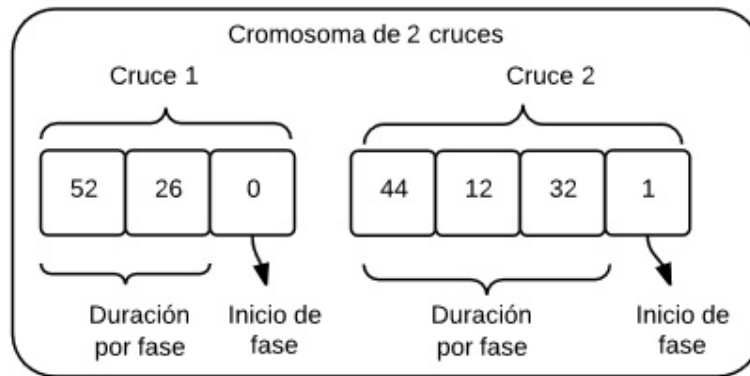


Figura 3.6: Cromosoma de 2 cruces

Es importante que el algoritmo no genere soluciones inviables por lo que no debe modificar la combinación de luces de cada fase para evitar combinaciones de luces erróneas. Por tanto la modificación se realizará solo en el valor que indica el comienzo de fase y en los tiempos relacionados.

```
<add>
  <tlLogic id="cluster_1894127318_917520037_917579892" type="static" offset="0">
    <phase duration="52" state="GGGGrrrrGGGGrrrr"/>
    <phase duration="3" state="yyyyrrrrrrrrrr"/>
    <phase duration="26" state="rrrrGGrrrrGGGG"/>
    <phase duration="6" state="rrrryyyyrrrryy"/>
  </tlLogic>
  <tlLogic id="cluster_1858033111_917381626_917457905" type="static" offset="1">
    <phase duration="44" state="rrrrrrrrGGGGrrrr" />
    <phase duration="3" state="rrrrrrrrrrrrrrrr" />
    <phase duration="12" state="rrrrGrrrrrrrrGrr" />
    <phase duration="3" state="rrrrrrrrrrrrrrrr" />
    <phase duration="32" state="GGGGrrrrrrrrrrrr" />
    <phase duration="3" state="yyyyrrrrrrrrrrrr" />
  </tlLogic>
</add>
```

Figura 3.7: Representación de Sumo

En la figura 3.7 vemos el archivo con la configuración de semáforos que utiliza el simulador para el cromosoma anterior, donde se representan las fases. Por ejemplo el estado *GGGGrrrrGGGGrrrr* indica la secuencia de luces y su duración de 52 segundos. *G* indica la luz verde, *r* la roja, *y* el Amarillo. El offset indica el inicio de la fase.

En la figura 3.8 se numeran los semáforos que se corresponden con la primera fase de este ejemplo, donde cada posición de la secuencia *estado* se corresponde a un color en particular.

Por tanto para *GGGGrrrrGGGGrrrr* tenemos que:

- GGGG se corresponde a 1, 2, 3 y 4.

- rrr a 5, 6 y 7.
- GGGG a 8, 9, 10 y 11.
- rrr a 12, 13 y 14.

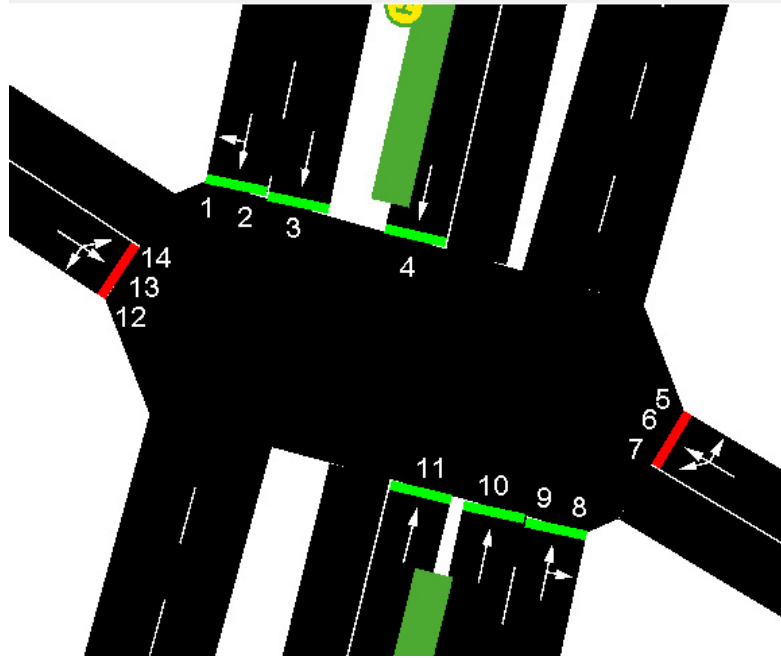


Figura 3.8: Representación de una fase de los semáforos para un cruce. Cada número se corresponde a una letra en la secuencia de *state* del archivo de configuración del simulador SUMO.

3.4.2. Población inicial

Para la inicialización de la población se toma como referencia la configuración obtenida con los datos in-situ, luego para cada cruce se hacen variar las duraciones de las fases de manera aleatoria entre un rango de valores configurable. Se elige la fase inicial aleatoriamente entre la cantidad de fases del cruce.

3.4.3. Función fitness

La evaluación de un individuo se realiza generando un archivo con la configuración de los semáforos en base a su cromosoma y ejecutando el simulador SUMO utilizando esta configuración para luego obtener los datos necesarios para calcular el fitness.

Se empleará una función multiobjetivo usando combinación lineal de la velocidad de los ómnibus y del resto de los vehículos, ya que es un método sencillo y adecuado cuando son menos de tres objetivos. El fitness se calcula como una suma ponderada, con los pesos fijados a priori.

$$F(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (3.1)$$

Se selecciona como objetivo la velocidad promedio de los ómnibus (vpb) y la velocidad promedio del resto de los vehículos (vpv). Esta métrica fue elegida pues es más adecuada para realizar las comparaciones con la realidad. Por ejemplo cantidad de vehículos que completan su viaje, duración promedio del recorrido o el tiempo de simulación son todas métricas que podrían usarse pero no son útiles a la hora de la comparación.

Esta es la formula de fitness donde x e y indica el peso que le vamos a especificar a la función.

$$f = x.vpb + y.vpv \quad (3.2)$$

En una primera instancia se establece $x = y = 1$ más adelante se experimentará con otros pesos.

Al apuntar a optimizar la velocidad promedio de los vehículos hay q tener en cuenta que es en toda la red, esto quiere decir que se busca una mejor velocidad promedio tanto en autos que van por Garzón como aquellos que realizan los cruces. Esto es fundamental ya que si se optimiza individualmente una calle podría traer problemas de congestión en las demás que cruzan.

3.4.4. Operadores

Operador de Cruzamiento

Se utilizará cruzamiento de un punto, seleccionando del cromosoma una posición aleatoria entre dos cruces como punto de corte, por tanto si un tramo del corredor tiene un buen comportamiento se intentará mantener esta propiedad.

En la siguiente figura los padres cuentan con tres cruces, se elige un punto de corte aleatoriamente entre dos cruces y se generan los hijos que son una combinación de los padres.

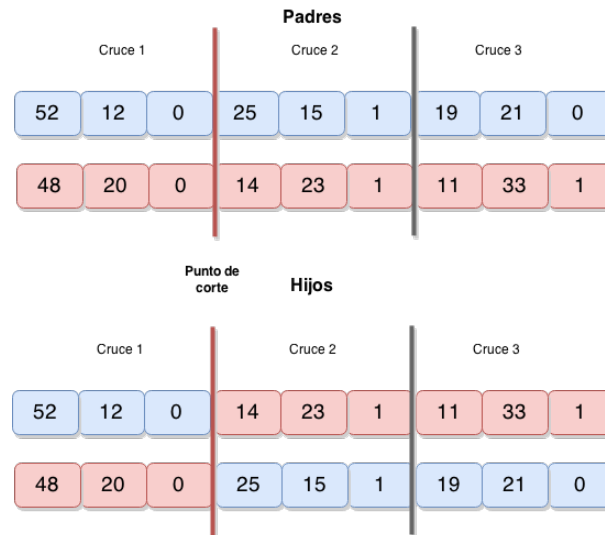


Figura 3.9: Visualización del cruzamiento entre individuos.

Operador de Mutación

Se implementaron dos tipos de mutación:

- Mutación de duración de fase: para cada fase de cada cruce se hace variar su duración sumando o restando una cantidad dada de segundos entre un rango determinado con una probabilidad dada. Teniendo en cuenta de que el valor obtenido este dentro de un rango para que no se produzcan casos irreales como un cruce de menos de 5 segundos.
- Mutación del *offset*: Se elige aleatoriamente una fase con la cual va a comenzar inicialmente el cruce con una probabilidad dada.

Operador de selección y reemplazo

Se utilizan los provistos por el algoritmo newGA de Malva. La selección de padres se realiza por el método de torneo de tres individuos y la selección de hijos por el método de ruleta. La política de reemplazo indica que tanto padres como hijos pueden ser parte de la siguiente generación, por lo que existe reemplazo de padres por hijos.

Parámetros del algoritmo

Los parámetros específicos del algoritmo se establecen en la siguiente sección, donde se realiza un análisis experimental para encontrar los más adecuados. Estos parámetros son: número de generaciones, tamaño de población, probabilidad de cruzamiento y de mutación.

Capítulo 4

Análisis Experimental

En esta sección se presenta la descripción de los escenarios, la plataforma de ejecución y el análisis experimental.

Este se divide en dos etapas, primero se realiza la configuración paramétrica para encontrar el mejor rendimiento del algoritmo y luego se realizan las pruebas donde se muestran los resultados y comparaciones.

4.1. Desarrollo y Plataforma de ejecución

Los algoritmos fueron desarrollados usando la biblioteca Malva que fue extendida en el código base para soportar la creación de nuevos hilos de ejecución para lograr el funcionamiento en paralelo.

Los escenarios fueron ejecutados en el cluster Fing.

Cluster: Es un conjunto de computadoras independientes conectadas para que trabajen integradas como un solo sistema. De esta forma se consigue un alto rendimiento en la ejecución de tareas.

Cluster Fing: Es una infraestructura de alto desempeño, que brinda soporte en la resolución de problemas complejos que demandan un gran poder de cómputo.

Descripción del *hardware*:

- 9 servidores de cómputo

- Quad core Xeon E5430, 2x6 MB caché, 2.66GHz, 1.333 MHz FSB.

- 8 GB de memoria por nodo.

- Adaptador de red dual (2 puertos Gigabit Ethernet).

- Arquitectura de 64 bits.

- Servidor de archivos: 2 discos de 1 TB, capacidad ampliable a 10 TB.

- Nodos de cómputo: discos de 80 GB.

- Switch de comunicaciones

- Dell Power Connect, 24 puertos Gigabit Ethernet.

- Switch KVM (16 puertos) y consola.

- UPS APC Smart RT 8000VA.

4.2. Ajuste paramétrico

Se busca la mejor configuración inicial de los parámetros realizando pruebas experimentales con diferentes combinaciones. Los elementos que se ajustaran serán los siguientes:

- Tiempo de simulación
- Criterio de parada
- Tamaño de la población
- Probabilidad de mutación
- Probabilidad de cruzamiento

Para la realización de las pruebas se generan tres escenarios de tráfico diferentes para realizar las pruebas de configuración. En este caso no se utilizan datos recabados de la realidad como el tráfico específico de las calles y el recorrido de las líneas de ómnibus. Esto para no sesgar el algoritmo a un caso en particular. Los tres escenarios de tráfico son los siguientes:

- Tráfico Bajo: 30 ómnibus y 500 vehículos
- Tráfico Medio: 60 ómnibus y 1000 vehículos
- Tráfico Alto: 120 ómnibus y 2000 vehículos

En el ajuste paramétrico primero se define el tiempo de simulación y el criterio de parada, luego de establecidos se realizan las pruebas para todas las combinaciones de tasa de cruzamiento y mutación buscando los mejores valores para optimizar el algoritmo.

Al estar utilizando un cluster tenemos disponible tanto la métrica del tiempo real que llevo la ejecución, así como también el tiempo secuencial, es decir la suma del tiempo de procesamiento de todos los procesadores involucrados en la evaluación del algoritmo.

Cuando se realicen comparaciones en los tiempos de ejecución se utilizara el tiempo secuencial que es independiente de la cantidad de procesadores utilizados en las pruebas. Las diferentes ejecuciones fueron realizadas sobre el Cluster utilizando entre 4 y 32 procesadores ya que por la naturaleza de recursos compartidos no siempre se tiene una cantidad igual de procesadores libres y para estas pruebas el número de procesadores no es relevante. Si lo será cuando realicemos el análisis de eficiencia computacional que será estudiando más adelante.

4.2.1. Pesos de la función fitness

Para las siguientes pruebas la función fitness del algoritmo (3.2) tendrá los pesos $x = y = 1$. Esto da pesos equitativos tanto a ómnibus como a otros vehículos por lo que no existe prioridad para uno u otro. más adelante se realizarán experimentos con otras variantes.

4.2.2. Tiempo de simulación

Esto se refiere al tiempo que representa una simulación usando SUMO, es un parámetro que se puede configurar y permite tener un mejor control sobre los tiempos totales de ejecución del algoritmo.

Se establece un tiempo de simulación de 4000 *steps* (medida interna de tiempo del simulador). Este número representa 66 minutos en la simulación, mientras el tiempo real de ejecución depende de la plataforma y de la cantidad de vehículos, pero se encuentra entre los 5 a 20 segundos. Se tuvo en cuenta y validó que en cada escenario más del 80 % de los vehículos completaran la simulación, es decir que llegaran a sus destinos. Se realizaron 10 ejecuciones del algoritmo para cada uno de los tres tipos de tráfico comprobando que se cumplía el criterio.

4.2.3. Criterio de parada

Se elige como criterio de parada el número de generación, esto permite estandarizar las pruebas para una mejor comparación. Para determinarlo se busca un compromiso entre un buen resultado y un tiempo de ejecución apropiado que no sea excesivo.

Para esto se decide que por un lado la ejecución del algoritmo deberá estar comprendida entre 1 y 24 horas, y además comprobar experimentalmente que el valor de fitness no tiene una gran variación en las ultimas 100 generaciones. Se ejecutaron 10 ejecuciones del algoritmo por cada tipo de tráfico.

Luego de la realización de las pruebas se elige el número de 500 generaciones como criterio de parada. En la siguiente gráfica se aprecia como el valor de fitness no presenta grandes variaciones luego de la generación 400 además el tiempo de ejecución real está dentro del margen pautado. La gráfica no muestra todos los valores, solo algunos representativos para una mejor visualización.

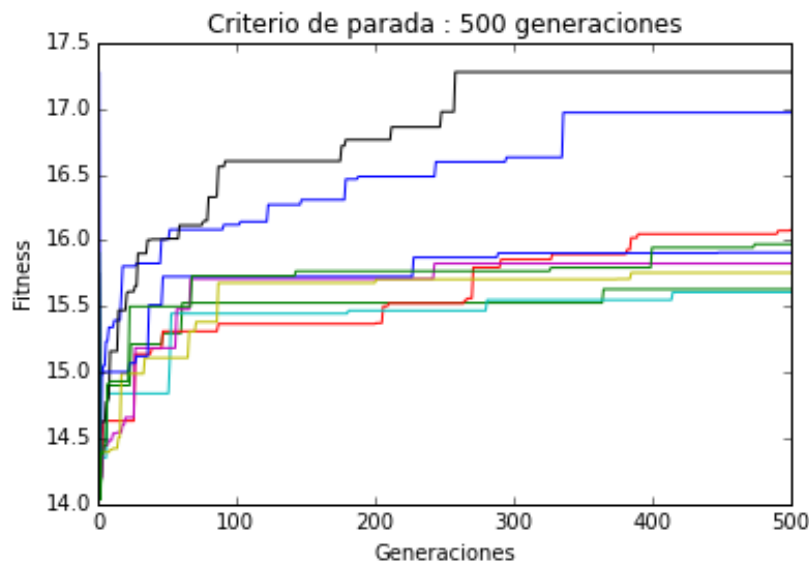


Figura 4.1: Resumen representativo de ejecuciones del algoritmo para establecer el criterio de parada.

4.2.4. Tamaño de la población

Para la elección de la población se tendrán en cuenta tres elementos: el valor de fitness encontrado, el tiempo de ejecución total y la plataforma de ejecución.

Dado que estamos ejecutando en el cluster y la máxima cantidad de procesadores que se pueden utilizar son 64 en un mismo nodo y teniendo en cuenta que la mejor distribución del trabajo es un elemento de población por procesador, se tiene que la máxima cantidad de población que estudiaremos será 64.

Luego se eligen los valores 32 y 48 para completar el análisis teniendo en cuenta que no son lo suficientemente bajos y son valores con los que se obtiene una distribución más adecuada. Se realizan 10 ejecuciones del algoritmo por cada tipo de tráfico y luego se obtuvo el promedio de esos valores.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos, como se aprecia no existen grandes diferencias en la elección de un número poblacional sobre otro. Por tanto se elige como número de población 32 teniendo en cuenta el tiempo de ejecución secuencial del algoritmo que como se aprecia es el menor. Se elige esta métrica por que aunque al ejecutar en paralelo el tiempo real que se puede obtener utilizando la máxima cantidad de procesadores para cada población son similares también se tiene en cuenta la disponibilidad y utilización de recursos que insume en el cluster fing. Por ejemplo obtener 64 procesadores para utilizar por un proceso en el cluster es algo que puede demorar varios días por la cantidad de otros procesos que también están funcionando en la plataforma y como se ve la ganancia que tenemos es mínima.

Cuadro 4.1: Comparación de fitness para distintas poblaciones

Población	Fitness		Tiempo ejecución serial (m)
	mejor	promedio	
32	17.28	16.37±0.5	10184±526
48	16.19	15.84±0.3	6772±256
64	17.27	16.46±0.6	4853±155

4.2.5. Probabilidad de mutación y cruzamiento

Los valores elegidos fueron:

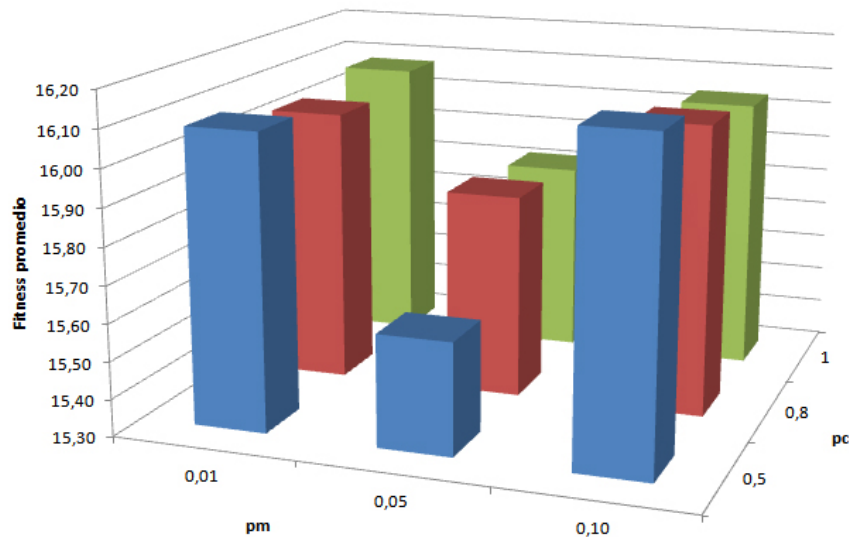
- Probabilidad de cruzamiento (pc): 0.5, 0.8, 1
- Probabilidad de mutación (pm): 0.01, 0.05, 0.1

Se prueban las nueve combinaciones posibles de cruzamiento y mutación, para cada una se realizan tres ejecuciones para el escenario con tráfico bajo, tres con tráfico medio y tres con tráfico alto.

Cuadro 4.2: Combinaciones de probabilidad de cruzamiento(p_C) y de mutación (p_M)

p_C	p_M	Fitness promedio \pm desviación estándar
0.5	0.01	16.09 \pm 0.30
0.5	0.05	15.60 \pm 0.17
0.5	0.1	16.16 \pm 0.42
0.8	0.01	16.04 \pm 0.55
0.8	0.05	15.85 \pm 0.32
0.8	0.1	16.08 \pm 0.34
1	0.01	16.08 \pm 0.45
1	0.05	15.82 \pm 0.34
1	0.1	16.04 \pm 0.25

Analizando la tabla y la gráfica se puede apreciar claramente que para una probabilidad de mutación de 0.05 se obtienen los peores resultados. Otro dato interesante es que no existe gran diferencia en el resto de las combinaciones.

Figura 4.2: Gráfica con combinaciones de probabilidad de cruzamiento(p_C) y de mutación (p_M)

Se comprueba que todas las muestras siguen la distribución normal para poder aplicar el test de Student.

Siendo las hipótesis de la prueba (μ_1 el promedio del grupo 1 y μ_2 el del grupo 2)

$H_0: \mu_1 = \mu_2$

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

Si hacemos una comparación entre la combinación del mejor promedio (0.5-0.1) y del peor (0.5-0.05) con el test de Student obtenemos $t(x) = 0.07$ que nos indica que para un nivel de significancia de 0,1 la hipótesis nula es rechazada por lo tanto existe

evidencia estadística para elegir la combinación con el mejor promedio (0.5-0.1) sobre la combinación con el peor promedio (0.5-0.05) para la ejecución del algoritmo.

Para comprobar si es la mejor opción se toman las dos combinaciones con el mejor promedio (0.5-0.1) y (0.5-0.01) obteniendo en el test Student $t(x) = 0.71$ que nos indica que no existe una diferencia significativa entre ambas muestras por lo que elegir una sobre otra no implicaría grandes beneficios.

En tal sentido podríamos elegir cualquiera de las dos, en este caso se elige la combinación (0.5-0.01) por su buen promedio y baja desviación estándar.

4.3. Descripción de escenarios

En esta sección se presentan los escenarios que serán evaluados, el primero es el escenario base que representa la realidad actual y el segundo un escenario alternativo que contiene modificaciones con el objetivo de mejorar la realidad.

4.3.1. Caso base o realidad actual del corredor

Esto representa la situación actual en términos de tráfico, red vial y sincronización de semáforos del corredor Garzón. El objetivo es obtener datos precisos para realizar una simulación de la realidad y poder obtener datos para comparar con los resultados del algoritmo.

Se valida su correctitud comparando los tiempos obtenidos en la simulación con tiempos obtenidos in-situ de los recorridos de ida y vuelta para los vehículos. Para el caso de los ómnibus se utilizan las frecuencias, cantidad y recorridos que son de acceso público.

Se realizó un estudio sobre datos proporcionados por la IMM que contenían el posicionamiento de los ómnibus, velocidad instantánea y datos de la línea durante todo el día para una semana en particular. De esta forma se constató que para las líneas de ómnibus que pasan por Garzón la velocidad promedio de los ómnibus es de 14.5 km/h.

Esto permitió calibrar el escenario modificando aspectos de la simulación relacionados con los ómnibus para mayor precisión.

Sobre este escenario geográfico se realizarán tres escenarios de tráfico : bajo, medio y alto. El caso medio representa los datos obtenidos, el bajo es disminuyendo el 50 % de vehículos y el tiempo de espera en las paradas de ómnibus teniendo en cuenta que en este caso existirá menos personas utilizando el transporte público. Las frecuencias de ómnibus se mantienen iguales ya que no son alteradas en la realidad. El caso de tráfico alto se aumenta 50 % los vehículos y el tiempo de espera en la parada de los ómnibus.

El aumento y disminución del 50 % se obtuvo al analizar datos proporcionados por la IMM de la zona de Garzón de años anteriores.

En resumen tenemos los siguientes escenarios de tráfico:

- Tráfico Alto: 2800 vehículos en la simulación y 70 ómnibus.
- Tráfico Medio: 2000 vehículos y 70 ómnibus.
- Tráfico Bajo: 1000 vehículos y 70 ómnibus.

4.3.2. Escenario alternativo

Para mostrar la utilidad que tienen las simulaciones sobre un escenario real, se realiza un escenario alternativo. Una de las ventajas principales es que no requiere gran inversión monetaria, de tiempo y que no afecta la situación actual de la realidad, por lo que se pueden generar distintas pruebas para encontrar aquellas que logren un beneficio.

Analizando aquellos puntos que se entienden podrían atentar contra el buen funcionamiento del Corredor, se agregan algunas modificaciones al escenario base para intentar mejorarlo.

El objetivo no es demostrar que esta será la mejor alternativa sino dar una de las muchas alternativas que se pueden generar y probar con la simulación si se logran mejoras. Ya que pueden existir limitaciones o reglas que no estamos tomando en cuenta y que deben cumplirse en la realidad.

Entre los cambios estudiados se encuentran: eliminación de paradas y pasajes peatonales, alternar paradas y modificación de reglas de semáforos.

4.4. Resultados

Se muestran los resultados obtenidos tanto de la simulación de la realidad, como de la aplicación del algoritmo sobre el mismo. Se presenta la simulación del escenario alternativo y la posterior evaluación. Además se realizan estudios sobre cambios en la función de fitness del algoritmo y un breve análisis de la eficiencia computacional.

4.4.1. Valores numéricos del caso base

En la tabla se pueden ver las métricas obtenidas para los diferentes instancias de tráfico simulado para el caso base. Estos datos representan la realidad actual del Corredor Garzón. Como se aprecia la velocidad promedio de los ómnibus ronda los 15km/h y la velocidad de los otros vehículos disminuye notoriamente al aumentar el tráfico.

Cuadro 4.3: Resultados del caso base mostrando la velocidad promedio ómnibus (vpb) y velocidad promedio vehículos(vpv) para los distintos tipos de tráfico

	$vpb(km/h)$	$vpv(km/h)$	Fitness
Tráfico Bajo	15.89	32.45	13.42
Tráfico Medio	14.59	28.81	12.05
Tráfico Alto	14.31	26.36	11.30

En este caso no se representa la desviación standard ya que los resultados de la simulación del caso base son constantes pues siempre se está probando los mismos recorridos de los vehículos y la configuración de los semáforos no cambia. Cuando se aplica el algoritmo, por cada ejecución, obtenemos un valor diferente de velocidad y fitness ya que tienen distintas configuraciones de semáforos, por eso se muestra la desviación standard en ese caso.

4.4.2. Resultados numéricos de la evaluación

Como se aprecia en la tabla 4.3 el algoritmo mejora la velocidad promedio tanto de ómnibus como de otros vehículos en los tres tipos de tráfico estudiados. Además la velocidad media de los vehículos se mantiene en un rango mucho más ajustado que en el caso original al variar el tráfico. Las mejoras logradas en el fitness son de hasta 24 %. A continuación se realizará el análisis estadístico para comprobar la mejora.

Cuadro 4.4: Resultados luego de ejecutado el algoritmo mostrando velocidad promedio ómnibus (vpb) y de otros vehículos(vpv) para los distintos tipos de tráfico

Tráfico	$v_{bp}(km/h)$	$v_{pv}(km/h)$	Fitness		Mejora fitness (%)	
			Promedio	Mejor	Promedio	Mejor
Bajo	17.92±0.18	34.30±0.40	14.50±0.14	14.88	8.04	10.8
Medio	16.95±0.32	33.29±0.29	13.95±0.15	14.19	15.70	17.7
Alto	16.51±0.61	32.90±0.25	13.72±0.17	14.04	21.40	24.2

Se realizaron 20 ejecuciones independientes para cada tipo de tráfico comprobando que siguieran una distribución normal.

Por tanto se puede aplicar el criterio de significancia estadística para validar los resultados, que dice que el algoritmo A es mejor que B si los resultados de A y B cumplen:

$$|f_{avg}(A) - f_{avg}(B)| > \max(std(f_A), std(f_B)) \quad (4.1)$$

En este caso A representa el algoritmo y B el caso base. Esto indica que la diferencia del resultado promedio del algoritmo restado al resultado del caso base debe ser mayor a la máxima desviación. Esto se cumple para todos los casos, por lo que podemos afirmar que existe evidencia estadística para decir que los resultados del algoritmo son mejores al del caso base.

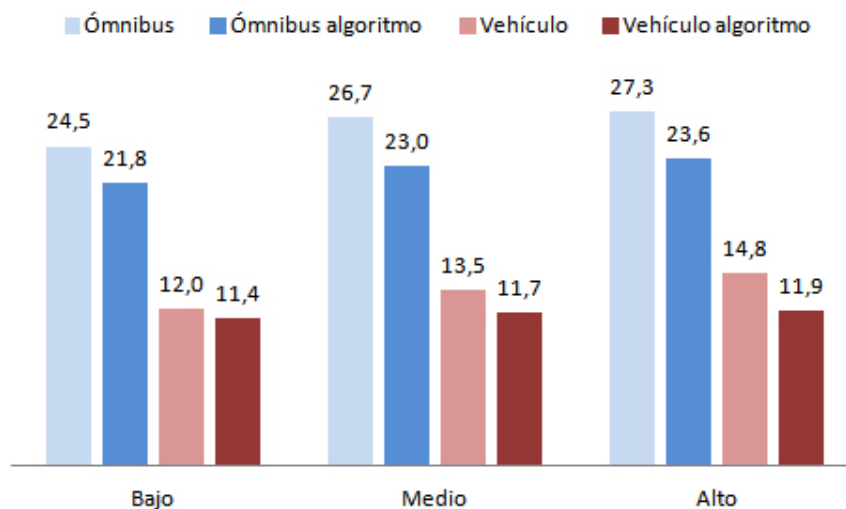


Figura 4.3: Comparación de la duración en minutos de los viajes para ómnibus y otros vehículos en el recorrido completo del corredor Garzón para los diferentes tipos de tráfico.

Como cabía esperar aumenta la duración del viaje al aumentar el tráfico, aunque un resultado interesante es que la duración original de los viajes cuando el tráfico es bajo es casi igual a la duración de los viajes con tráfico alto luego de ejecutar el algoritmo. Para ómnibus tenemos 24.5m y 23.6m y para otros vehículos 12.0m y 11.9m.

4.4.3. Detalles del escenario alternativo

Los cambios propuestos incluyen eliminación de paradas, semáforos, pasajes peatonales y alternar paradas. Se estudiaron otras propuestas pero fueron descartadas por la poca viabilidad real de las mismas. Como por ejemplo construir calles paralelas a Garzón o nuevas reglas en los cruces como existen en otros países.

Eliminación de paradas

Se consideraron dos paradas a eliminar que cumplieran con algunas características: no fueran cercana a una calle principal, que existiera otra parada cercana y que la eliminación de la parada no afecte en demasía a la gente en un traslado mayor. En este caso se seleccionó la parada en la calle Ariel y Casavalle.

Eliminación de pasajes peatonales

Hay tres pasajes peatonales en el corredor con semáforos que detienen el tráfico, dos de ellos solo manejan una esquina (sin pulsador en funcionamiento) donde en el escenario alternativo se implementó solamente mediante un *pare* en la calle transversal al corredor y el otro es netamente peatonal frente a la Facultad de Agronomía que fue totalmente eliminado. Una opción que mantiene los pasajes peatonales así como también los resultados obtenidos en el escenario alternativo sería implementar el pasaje peatonal por encima del corredor. Al eliminar los pasajes peatonales se aumenta la velocidad media de todo el transporte.

Alternar paradas

Uno de los problemas del ómnibus es su baja aceleración por lo que cada vez que este frena en un semáforo o en una parada demora en retomar una velocidad aceptable. Por tanto al reducir la cantidad de paradas que un ómnibus tiene que hacer se mejora la velocidad promedio. La línea G es la que recorre a Garzón de punta a punta, esta línea es cubierta por las empresas Coectc y Cutcsa. Una posibilidad de alternancia de paradas consiste en dividir las paradas por empresa y compartir las ganancias del corredor u otro método para equiparar el pasaje transportado.

de costos o facilidad para manejar los dos semáforos de los carriles paralelos juntos. Al suceder en varias intersecciones y para los dos lados se mejora la velocidad promedio de los autos que circulan por los dos carriles.

Este cambio se aplicó en las siguientes intersecciones:

- Islas Canarias: dobla línea 409 hacia la izquierda, orientado a Colón.
- Camino Ariel: doblan líneas como la 2 y la 148 hacia la izquierda, orientado a Paso Molino.
- Camino Casavalle: dobla línea 174 hacia la izquierda, orientado a Paso Molino.

Valores numéricos al aplicar los cambios

Para determinar cuales son los cambios que logran mejores rendimientos se elabora la tabla 4.5. Esta se basa en el tráfico medio ya que solo se quiere realizar una comparación sencilla de las mejoras realizadas. Estos cambios son acumulativos, por lo que se hacen uno después del otro. Se puede apreciar que el que logra una mayor diferencia es la creación de paradas alternadas.

Cuadro 4.5: Valores del escenario alternativo con su velocidad promedio ómnibus (vpb) y velocidad promedio vehículos(vpv) comparando el fitness para el tráfico medio

	<i>vbp(km/h)</i>	<i>vvp(km/h)</i>	Fitness	Mejora(%)
Base	14.59	28.81	12.05	-
Eliminar Paradas	15.44	29.03	12.35	2.4
Eliminar Peatonales	16.02	29.32	12.59	4.4
Paradas alternadas	19.17	28.88	13.34	10.7
Cambio reglas	18.50	29.70	13.39	11.1

Una vez que se aplican todas las modificaciones sobre el escenario, se realiza un análisis para los demás tipos de tráfico. Como se ve en la tabla 4.6 se obtienen mejores rendimientos en todos los tipos de tráfico estudiados y el mejor rendimiento se obtiene cuando el tráfico es alto.

Cuadro 4.6: Mejoras obtenidas para las velocidades promedio de los ómnibus(vpb) y de otros vehículos (vpv) en el escenario alternativo para distintos tipos de tráficos

	<i>vbp(km/h)</i>	<i>vvp(km/h)</i>	Fitness	Mejora fitness(%)
Tráfico Bajo	20.72	33.18	14.97	11.5
Tráfico Medio	18.50	29.70	13.39	11.1
Tráfico Alto	18.60	27.17	12.7	12.6

Una vez que tenemos este escenario alternativo se procede a aplicarle el algoritmo cuyo resultado veremos a continuación.

4.4.4. Resultados de la evaluación sobre el escenario alternativo

El escenario alternativo supuso una mejora sustancial en comparación con el caso base con una mejora de alrededor 11 %, ahora vamos a aplicar el algoritmo para determinar si todavía se puede mejorar al modificar la configuración de los semáforos.

Los resultados obtenidos en la tabla 4.7 claramente mejoran el rendimiento del escenario alternativo y por supuesto del caso base en todos los tipos de tráfico. Comparando con la realidad actual se logran mejoras de hasta 37 %.

Al comparar los resultados obtenidos se aprecia claramente que cuanto más densidad de tráfico mayor es el porcentaje de mejora. Además un resultado interesante es que las diferencias entre los valores de los distintos tipos de tráfico se redujo.

Cuadro 4.7: Mejoras obtenidas al aplicar el algoritmo sobre el escenario alternativo. Comparando las velocidades de ómnibus(vbp), otros vehículos(vpv) y el fitness con cada tipo de tráfico contra el caso base o realidad actual.

Tráfico	$vbp(km/h)$	$vpv(km/h)$	Fitness		Mejora fitness (%)	
			Promedio	Mejor	Promedio	Mejor
Bajo	23.15 ± 0.36	34.43 ± 0.33	15.99 ± 0.08	16.10	19.1	19.90
Medio	21.83 ± 0.50	33.89 ± 0.22	15.47 ± 0.09	15.65	28.3	29.87
Alto	21.46 ± 0.54	33.41 ± 0.38	15.24 ± 0.19	15.50	34.8	37.10

En la gráfica 4.5 se puede apreciar la comparación en la duración de los viajes. Se produce una gran reducción en la duración de los viajes para todos los tráficos para el caso de los ómnibus mientras para los vehículos la mayor diferencia ocurre cuando el tráfico es alto.

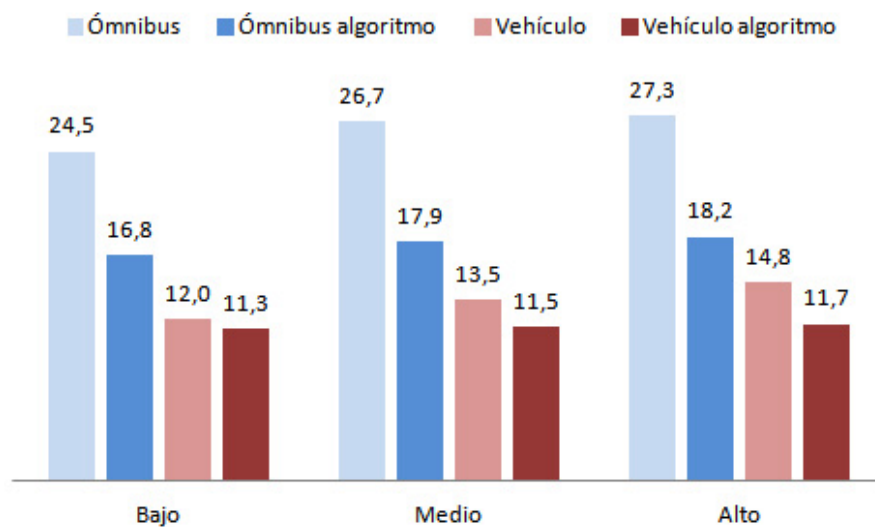


Figura 4.5: Comparación de la duración en minutos de los viajes para ómnibus y otros vehículos en el recorrido completo del corredor Garzón para los diferentes tipos de tráfico. Al aplicar el algoritmo sobre el escenario alternativo.

Otra vez podemos aplicar el criterio de significancia estadística(4.1) para comprobar

que la mejora es significativa tanto al comparar con los valores del caso base como con los del alternativo.

4.4.5. Variación de la función de fitness

La función fitness (3.2) utilizaba los pesos $x = y = 1$ lo que representa un balance equitativo para ómnibus y vehículos.

Estos pesos pueden ser variados en función de lo que se necesite, por lo que se realizarán pruebas con dos tipos de pesos para comparar como varían las velocidades cuando se da más peso a un tipo de vehículo sobre el otro.

Prioridad ómnibus

En este caso se le dará más prioridad a los ómnibus, esto se sostiene en el hecho que uno de los objetivos buscados por la IMM es que se utilice más el transporte colectivo como parte de su Plan de Movilidad Urbana (IMM, 2010). Con la premisa que al mejorar la duración del viaje en ómnibus en relación al del auto por el corredor, las personas que utilizan auto para sus viajes opten por el transporte colectivo.

Por tanto vamos a experimentar cambiando los pesos de la función fitness con un peso de 70 % para los ómnibus y 30 % al resto de los vehículos.

Prioridad a otros vehículos

En este caso, le damos 70 % del peso a los vehículos y 30 % a los ómnibus. Es el caso opuesto al anterior y servirá para poder comparar como varían los valores de las velocidades.

Resultados

La siguiente tabla compara las velocidades promedio de ómnibus y vehículos para los tres tipos de pesos que se probaron y por cada tipo de tráfico. El caso 50-50 es el caso base donde los pesos son iguales, 70-30 es el caso con más prioridad para los ómnibus y el 30-70 más prioridad a los otros vehículos. Se analiza cuanto varían las velocidades de ómnibus (var. vpb) y otros vehículos (var. vpv) comparando contra el caso 50-50 de cada tipo de tráfico.

Cuadro 4.8: Modificación de los pesos para ómnibus (pb) y para otros vehículos (pv) en la función fitness. Analizando las variaciones en la velocidad promedio de ómnibus (vpb), otros vehículos (vpv) y fitness.

Tráfi- co	pb(%) pv (%)	vpb	vpv	fitness	var. vpb(%)	var. vpv(%)	var. fitness(%)
Bajo	50-50	17.92±0.18	34.30±0.40	14.50±0.14	-	-	-
	70-30	17.93±0.23	34.06±0.17	12.65±0.11	+0.07	-0.70	-12.79
	30-70	17.55±0.23	34.71±0.21	16.42±0.10	-2.06	+1.18	+13.21
Medio	50-50	16.95±0.32	33.29±0.29	13.95±0.15	-	-	-
	70-30	17.29±0.27	33.08±0.14	12.24±0.12	+2.0	-0.62	-12.30
	30-70	16.71±0.42	33.79±0.31	15.92±0.11	-1.41	+1.49	+14.11
Alto	50-50	16.51±0.60	32.90±0.25	13.72±0.17	-	-	-
	70-30	16.72±0.14	32.79±0.26	13.75±0.07	+1.24	-0.33	+0.19
	30-70	15.48±0.42	33.20±0.25	15.49±0.16	-6.23	+0.92	+12.87

Los resultados indican que al variar los pesos de la función fitness las velocidades promedio de los vehículos se ve afectada. En el caso de dar más prioridad a los ómnibus se produce como cabía esperar un aumento en su velocidad promedio y una leve baja en la velocidad promedio del resto de los vehículos. Cuando el tráfico es bajo este cambio casi no aumenta la velocidad de los ómnibus, una explicación posible de este comportamiento es que ya se llegó a un límite máximo y no se puede mejorar más.

Al dar más prioridad a los otros vehículos se produce un aumento en su velocidad y una disminución en la velocidad de los ómnibus la cual es muy evidente en el caso de tráfico alto. Este resultado permite apreciar como estos valores son fuertemente afectados por la densidad de tráfico que se estudie.

En general las variaciones en las velocidades no son grandes pero suficientemente apreciable para tener cierta libertad al plantear distintos objetivos que tiendan a favorecer un tipo u otro de vehículos.

4.4.6. Eficiencia computacional

Se realiza un estudio de la eficiencia computacional del algoritmo para analizar los tiempos de ejecución cuando se usan varios procesadores y como se comporta su capacidad de paralelismo.

Se evalúan nueve ejecuciones del algoritmo; tres con cada tipo de tráfico: alto, medio y bajo. Para estudiarlo en diferentes contextos. El algoritmo utiliza 32 hilos de ejecución por lo que utilizamos esa cantidad de procesadores.

Las pruebas fueron realizadas sobre el node40 del Cluster Fing que tiene las siguientes características:

- Modelo: HP Proliant DL585
- Procesador: AMD Opteron 6272 2.09GHz
- Memoria: 48GB
- Cores utilizados: 32

El speedup(S) mide la mejora de rendimiento de una aplicación al aumentar la cantidad de procesadores comparando con el rendimiento al usar un solo procesador.

$$S = \frac{T_1}{T_N} \quad (4.2)$$

Donde T_1 es el tiempo de ejecución del algoritmo serial o secuencial, y T_N el tiempo del algoritmo ejecutado sobre N procesadores.

La eficiencia computacional (E) corresponde al valor normalizado del speedup (entre 0 y 1) respecto a la cantidad de procesadores. Los valores cercanos a uno indican una alta eficiencia computacional.

$$E = \frac{T_1}{N * T_N} = \frac{S}{N} \quad (4.3)$$

Cuadro 4.9: Análisis de eficiencia computacional comparando los tiempos de ejecución en serial y paralelo en minutos.

Instancia	Serial(m)	Paralelo(m)	Speedup	Eficiencia
bajo1	1572	59	26.64	0.83
bajo2	1571	59	26.62	0.83
bajo3	1183	44	26.88	0.84
medio1	3002	119	25.22	0.78
medio2	2195	82	26.76	0.83
medio3	3007	120	25.05	0.78
alto1	2920	110	26.5	0.82
alto2	4365	183	23.85	0.74
alto3	4276	177	24.15	0.75
		Promedio	25.7±1.1	0.80±0.03

El algoritmo paralelo logra una mejora sustancial en los tiempos de ejecución con un valor promedio del speedup de 25.7 y eficiencia promedio de 0.8, lo cual puede considerarse como buenas métricas.

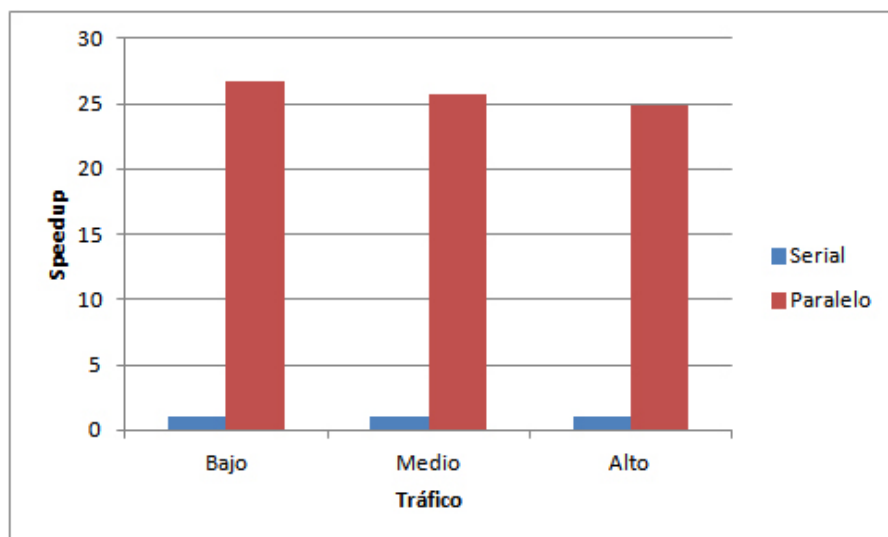


Figura 4.6: Comparación de los speedup promedios para cada tipo de tráfico. Se representa el caso serial que corresponde al $\text{speedup}=1$ para fines de comparación.

En la gráfica se observa como a medida que aumenta el tráfico disminuye el speedup esto sucede por que está influenciado por los accesos al disco duro, al tener más autos circulando en la simulación se tiene que leer y escribir más información en los archivos lo que aumenta el tiempo de ejecución del algoritmo, aunque como se ve esto no tiene un gran impacto.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

Los objetivos planteados al principio del trabajo fueron cumplidos. Se encontró información útil al realizar la investigación sobre los trabajos relacionados que ayudó a mejorar la solución presentada. Al estudiar el problema del tráfico se constató que realmente afecta a la población y al desarrollo de las ciudades, por tanto es imprescindible la búsqueda de nuevas soluciones. A nivel de nuestro país no se encontraron soluciones similares, por lo que este trabajo es un aporte interesante que demuestra que existen tanto las herramientas como el conocimiento necesario para realizarlo.

Las simulaciones demostraron su valor al dar la flexibilidad de probar distintas variantes de forma sencilla y poder crear un escenario alternativo con modificaciones agregadas que logra una mejora del 11 % en el valor de fitness.

A pesar de que el problema de sincronización de semáforos es un problema difícil de abordar, los resultados obtenidos muestran la capacidad de los algoritmos genéticos para resolver problemas de este tipo, obteniendo evidencia estadística de que logra mejorar la situación actual. En general el algoritmo logra una mejora de hasta 24.2 % (21.40 % en promedio) de el valor de fitness comparando con la realidad actual, mientras el escenario alternativo obtiene una mejora de hasta 37.1 % (34.7 % en promedio) en el valor de fitness.

El enfoque multiobjetivo aún siendo básico dio la flexibilidad para analizar las diferentes velocidades medias de ómnibus y otros vehículos, lo que permitió realizar comparaciones independientes que dotaron al trabajo de un nivel de detalle mayor.

El desarrollo de algoritmos con capacidad de paralelización son fundamentales sobre todo en problemas complejos que requieren mucho poder de computo como el que se abordó. El algoritmo obtuvo buenas métricas de speedup sin las cuales hubiera sido muy difícil generar la cantidad de pruebas presentadas.

5.2. Trabajo futuro

La elaboración de los mapas para la simulación requiere modificaciones para que sean reconocidos por el simulador, en algunos casos se tuvo que realizar manualmente ya que las herramientas no brindaban la granularidad necesaria. Además el agregado de la configuración de semáforos, de las líneas y paradas de ómnibus puede ser un proceso lento y propenso a errores, por tanto para un futuro se sugiere la creación o búsqueda de herramientas que automaticen o agilicen este trabajo.

El algoritmo puede ser aplicado a otros lugares con solo cambiar los datos de entrada: mapa, tráfico, configuración de los semáforos y recorrido de ómnibus. Dado el alcance del trabajo solo se enfocó en la zona del Corredor Garzón pero sería interesante aplicarlo en otros escenarios para determinar su rendimiento.

Los trabajos de Montana y Czerwinski (1996) y Vogel et al. (2000) proponen la adaptabilidad del algoritmo en tiempo real, aunque esto requiere del agregado de sensores a la red puede ser un método de mejora importante sobre todo en zonas de gran densidad de tráfico.

Bibliografía

- T. Alba. Propuesta para la implementación de algoritmos evolutivos. <http://neo.lcc.uma.es/TutorialEA/semEC/main.html>, 1997.
- Autoanuario. Gráficas y cuadros de valores estadísticos del mercado nacional. http://www.autoanuario.com.uy/index_mercado_graficas.html, 2014. Disponible online, consultado noviembre 2014.
- BBVAResearch. Uruguay situación automotriz. https://www.bbvarresearch.com/wp-content/uploads/2014/05/1303_SitAutomotrizUruguay_2013.pdf, 2013. Disponible online, consultado noviembre 2014.
- CEPAL. Congestión de tránsito, el problema y cómo enfrentarlo. <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/9/13059/cue-87.pdf>, 2003. Disponible online, consultado noviembre 2014.
- CHC. Chc method. <http://neo.lcc.uma.es/mallba/easy-mallba/html/algorithms.html#chc>. Disponible online, consultado noviembre 2014.
- CORSIM. Corsim. <http://www-mctrans.ce.ufl.edu/featured/TSIS/Version5/corsim.htm>. Disponible online, consultado agosto 2014.
- CTRE. Handbook of simplified practice for traffic studies : Traffic volume counts. <http://www.ctre.iastate.edu/pubs/traffichandbook/3trafficcounts.pdf>, November 2002. Disponible online, consultado noviembre 2014.
- K. Deb. Multiobjective optimization using evolutionary algorithms. 2001.
- DiFebbraro, Giglio, y Sacco. On applying petri nets to determine optimal offsets for coordinated traffic light timings. *Proc. IEEE 5th Int. Conf. Intell. Transportation Syst.*, pages 773–778, 2002.
- M. T. E. Alba. Parallelism and evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *IEEE Press*, 6(5):443–462, 2002.
- ElPais. Garzón: Olivera admitió errores. <http://www.elpais.com.uy/informacion/garzon-olivera-admitio-errores.html>, 2013. Disponible online, consultado febrero 2015.
- ElPais. Ana olivera: "no hay justificación, nos equivocamos con garzón". <http://www.elpais.com.uy/informacion/ana-olivera-no-justificacion-corredor.html>, 2015. Disponible online, consultado febrero 2015.

- I. R. Eugenio Bañobre. Los brt en corredores segregados como sistema óptimo de transporte urbano. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3119987>, 2009. Disponible online, consultado febrero 2015.
- K. H. G. Kotusevski. A review of traffic simulation software. 2009.
- J. J. K. G. Y. Lim y Y. S. Hong. The optimization of traffic signal light using artificial intelligence. *10th IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst*, page 1279–1282, 2001.
- Galib. Galib. <http://lancet.mit.edu/ga/>, 1999. Disponible online, consultado marzo 2015.
- D. Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. 1989.
- IMM. Intendencia municipal de montevideo. <http://www.montevideo.gub.uy>. Disponible online, consultado febrero 2015.
- IMM. Plan de movilidad urbana. http://www.montevideo.gub.uy/sites/default/files/plan_de_movilidad.pdf, Febrero 2010. Disponible online, consultado febrero 2015.
- INE. Transporte y comunicaciones. http://www.ine.gub.uy/biblioteca/uruguayencifras2014/Uruguay_en_cifras_2014_Cap_11.pdf, 2014. Disponible online, consultado enero 2015.
- Institute for Transportation & Development Policy (ITDP). Bus rapid transit planning guide. <http://www.nbrti.org/docs/pdf/ITDPBRTPPlanningGuide.pdf>, Junio 2007. Disponible online, consultado febrero 2015.
- JMetal. Jmetal. <http://jmetal.sourceforge.net/>, 2015. Disponible online, consultado marzo 2015.
- JOSM (Java OpenStreetMap Editor). Josm (java openstreetmap editor). <https://josm.openstreetmap.de/>.
- J. Koza. Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection. 1992.
- S. López, P. Hernandez, A. Hernandez, y M. Garcia. Artificial neural networks as useful tools for the optimization of the relative offset between two consecutive sets of traffic lights. *Foundations and Tools for Neural Modeling*, page 795–804, 1999.
- Mallba. Mallba library. <http://neo.lcc.uma.es/mallba/easy-mallba/index.html>. Disponible online, consultado julio 2014.
- Malva. The malva project. <http://themalvaproject.github.io/>. Disponible online, consultado julio 2014.
- M. Mitchell. An introduction to genetic algorithms. 1996.
- D. J. Montana. Strongly typed genetic programming. *Evolutionary Computation*, 3(2): 199–230, 1995.

- D. J. Montana y S. Czerwinski. Evolving control laws for a network of traffic signals. 1996.
- S. Nesmachnow. Evolución en el diseño y clasificación de algoritmos genéticos paralelos,. 2002.
- Open Beagle. Open Beagle. <https://code.google.com/p/beagle/>, 2012.
- OSM. Open street map. www.openstreetmap.org/. Disponible online, consultado agosto 2014.
- L. Papaleontiou. Sumo traffic modeler. <http://sourceforge.net/projects/trafficmodeler/>. Disponible online, consultado diciembre 2014.
- Paradiseo. Paradiseo. <http://paradiseo.gforge.inria.fr/>, 2010.
- J. Penner, R. Hoar, y C. Jacob. Swarm-based traffic simulation with evolutionary traffic light adaptation. 2002.
- A. K. Rathi. Urban network traffic simulation:traf-netsim program. *Journal of Transportation Engineering*, 116(6):734–743, November-December 1990.
- I. Rechenberg. Evolutionsstrategie - optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution. 1971.
- N. M. Rouphail, B. B. Park, y J. Sacks. Direct signal timing optimization: Strategy development and results. 2000.
- SIG IMM. Sistema de información geográfica montevideo. <http://sig.montevideo.gub.uy>. Disponible online, consultado agosto 2014.
- J. Sánchez, M. Galán, y E. Rubio. Genetic algorithms and cellular automata: A new architecture for traffic light cycles optimization. 2004.
- J. Sánchez, M. Galán, y E. Rubio. Applying a traffic lights evolutionary optimization technique to a real case: “Las Ramblas” Area in Santa Cruz de Tenerife. 2008.
- J. Sánchez, M. Galán, y E. Rubio. Traffic signal optimization in “La Almozara” District in Saragossa under congestion conditions, using genetic algorithms, traffic microsimulation, and cluster computing. 2010.
- D. H. Stolfi. Optimización del tráfico rodado en ciudades inteligentes. 2012.
- Subrayado. Expertos en tránsito: “el colapso está establecido” en montevideo. <http://www.subrayado.com.uy/Site/noticia/23835/expertos-en-transito-el-colapso-esta-establecido-en-montevideo>, 2013. Disponible online, consultado noviembre 2014.
- SUMO. Simulation of urban mobility. http://sumo.dlr.de/wiki/Main_Page. Disponible online, consultado agosto 2014.
- Sumo Features. Sumo Features. http://sumo.dlr.de/daily/userdoc/Sumo_at_a_Glance.html, 2014.

- K. T. K. Teo, W. Y. Kow, y Y. K. Chin. Optimization of traffic flow within an urban traffic light intersection with genetic algorithm. 2010.
- TRANSYT-7F. Transyt-7f. http://mctrans.ce.ufl.edu/mct/?page_id=943. Disponible online, consultado agosto 2014.
- A. Vogel, C. Goerick, y W. von Seelen. Evolutionary algorithms for optimizing traffic signal operation. 2000.