



Universidad de Burgos  
Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales  
Departamento de Economía Aplicada

Programa de doctorado “Técnicas Modernas para la Toma de  
Decisiones: Fundamentos y Aplicaciones”

Tesis doctoral

**“RACIONALIZACIÓN DE LA RED DE AUTOBUSES DE  
TRÁNSITO RÁPIDO (BRT).  
ANÁLISIS DE DIFERENTES OBJETIVOS. APLICACIÓN A  
LA CIUDAD DE MÉXICO”**

Presentada por:

Antonio García de la Parra Motta

Director de la tesis:

Dr. Joaquín A. Pacheco Bonrostro

Burgos

Julio de 2015



## **Dedicatoria**

Quisiera dedicar esta tesis doctoral a todas aquellas personas que de una u otra forma han estado conmigo en este largo proceso y que sin su apoyo no hubiera sido posible la culminación de tantos años de esfuerzo, trabajo y dedicación:

En primer lugar a Dios, por brindarme la oportunidad de estar vivo y de tantas oportunidades a lo largo de la vida, gracias por hacerme ver que este proceso conlleva muchas enseñanzas, altibajos, sin sabores, pero sobre todo muchas satisfacciones también.

A mis padres, por estar conmigo en todo momento, por ser una indudable referencia y guía a lo largo de mi vida, por haberme forjado como la persona que soy actualmente, gracias por su amor y su paciencia:

Mamá: ¿Recuerdas cuando me dijiste sobre la posibilidad de hacer el doctorado? Sin lugar a dudas, esa conversación cambió el rumbo de mi vida profesional y dio un giro completo a mi visión sobre la vida. Gracias por todo tu apoyo incondicional, por tu comunicación constante, por estar al pendiente y siempre creer en mí, esto va por ti.

Papá: Tú ejemplo de rectitud y honestidad han sido punto de partida en mi vida, gracias por tus consejos, por tus recomendaciones, por tu ayuda en el proyecto, por ser un apoyo constante y por recordarme lo importante que es terminar un compromiso, comparto este logro contigo.

A ti Paty, que no tengo palabras suficientes para agradecerte todo el apoyo que de manera incondicional me has brindado como cómplice, testigo y consejera en este proceso, gracias por ponerme en ocasiones de nuevo en el redil. Eres una persona fundamental en mi vida, gracias hermana por estar siempre presente y recuerda que parte de este logro ha sido por ti.

Gracias Andy, por tu apoyo incondicional hermana, por compartir conmigo los buenos y los malos momentos, por estar conmigo en la culminación de este logro tan importante,

confío que la vida nos haga estar cada vez más unidos, participando de los grandes momentos.

A Fred, por haberme recibido en Madrid, por permitirme convivir con ustedes en esas estancias doctorales, por tu apoyo durante las mismas, han sido de los mejores momentos de mi vida y que nunca olvidaré.

Este trabajo está dedicado a tres ilustres personajes, que con sus ocurrencias, sus charlas y su cariño le han dado una chispa muy especial a mi vida, quiero compartir este logro con ustedes, les doy las gracias por darme la oportunidad de ser su tío, esto es para ustedes: Alfredo, Andrés y Mateo.

Finalmente, para ti Javier, no tengo palabra alguna para agradecerte tu incomparable mezcla de paciencia, comprensión, cariño y aguante, tus sugerencias en la biblioteca fueron punto de partida para la realización y culminación de esta tesis doctoral. Espero poder acompañarte en tus proyectos futuros tal y como tú lo has hecho conmigo.

## **Agradecimientos**

Esta tesis doctoral no pudo haberse llevado a cabo sin el apoyo de diversas personas e instituciones, a las cuales deseo agradecer de manera especial y a su vez, doy gracias a Dios por haberlas puesto en mi camino:

En primer lugar a mi director de tesis, Joaquín Pacheco, no tengo palabras para agradecerte tu tiempo, tu dedicación, tus comentarios, tu guía, tus correcciones, pero sobre todo tu apoyo incondicional al proyecto, que sin lugar a dudas han dado un efecto positivo en los resultados obtenidos, espero que sigamos colaborando en futuras ocasiones y que esto sea el principio de una gran amistad. Has hecho que aprendiera y que creciera no solamente como profesional sino como ser humano ¡Muchas gracias de todo corazón!

En segundo lugar, a Diana Piloyan, por tu tiempo y dedicación en ayudarme a las correcciones del proyecto, eres una de las personas más detallistas que he conocido, no tengo palabras suficientes para agradecerte desde haberme puesto en el camino de la docencia, tu apoyo incondicional, por estar al pendiente, pero sobre todo por tu amistad todos estos años. Parte de este trabajo tiene tu granito de arena ¡Muchísimas gracias!

En especial, deseo agradecer a tres instituciones, en las cuales ha transcurrido mi vida académica: mis *alma mater*. Gracias a los Departamentos de Economía y Estudios Empresariales de la Universidad Iberoamericana por brindarme la oportunidad de maravillarme y seguir creciendo en el mundo de la docencia y al Patronato Económico y de Desarrollo de dicha universidad por el apoyo recibido durante la realización de esta tesis doctoral. Gracias a todos mis profesores de la Universidad Autónoma de Madrid, que de ellos aprendí tantas cosas en las primeras etapas del doctorado y que de alguna forma fueron las bases para el desarrollo de esta tesis doctoral; al personal administrativo por su apoyo constante. Al personal académico y administrativo del Departamento de Economía Aplicada de la Universidad de Burgos, por el apoyo recibido en la realización del proyecto, ya que siempre han estado presentes cuando los he necesitado.

Finalmente, a todas aquellas personas no mencionadas anteriormente, que de manera directa o indirecta estuvieron presentes en mi paso por el doctorado, gracias por su apoyo, su paciencia, su tiempo, sus comentarios, por los buenos y malos momentos, en definitiva forman parte del cumplimiento de este logro.

# Índice

## 1. Introducción

1.1 Descripción del problema	3
1.2 Motivación	6
1.3 Objetivos	9
1.4 Contribución científica	10
1.5 Estructura de la tesis	10

## 2. Heurística en Optimización

2.1 Técnicas de solución de los problemas de optimización combinatoria	15
2.1.1 Métodos exactos	17
2.1.2 Heurísticos	18
2.1.3 Metaheurísticos	21
2.1.3.1 Búsqueda local	22
2.1.3.2 Búsqueda tabú	24
2.1.3.3 Búsqueda por Entornos Variables (VNS)	25
2.1.3.4 Procedimientos de Búsqueda basados en funciones Ávidas, Aleatorias y Adaptativas (GRASP)	27
2.1.3.5 Temple o recocido simulado	28
2.1.3.6 Colonias de hormigas	29
2.1.3.7 Búsqueda dispersa	30
2.1.3.8 Algoritmo basado en nubes de partículas	31
2.1.3.9 Algoritmos meméticos	32

## 3. Optimización Multiobjetivo

3.1 Metaheurísticos para problemas multiobjetivo	37
3.1.1 Métodos basados en poblaciones	38
3.1.2 Métodos escalares	39
3.2 Enfoques de solución de problemas multiobjetivo	41

<b>4. Problemas de transporte urbano: Modelos y métodos de solución</b>	
4.1 Métodos aplicados al transporte urbano	45
4.2 Problemas existentes en el campo del transporte urbano	50
4.2.1 Problemas de las rutas	51
4.2.2 Problemas del transporte urbano	55
<b>5. El Sistema de Autobuses de Tránsito Rápido en la Ciudad de México: Ventajas y Problemas</b>	
5.1 Organización funcional de la ordenación del territorio en la Ciudad de México	65
5.1.1 Necesidades de movilidad	67
5.2 Sistema de Autobuses de Tránsito Rápido	72
5.2.1 ¿Qué es?	72
5.2.2 Elementos que lo componen	73
5.2.3 Ventajas	75
5.2.4 Tipología	76
5.3 Experiencias internacionales	78
5.3.1 Colombia	79
5.3.2 Brasil	81
5.3.3 China	83
5.3.4 India	86
5.4 La respuesta en los sistemas de transporte en la Ciudad de México	88
5.4.1 Antecedentes	88
5.4.2 Objetivos principales	90
5.4.3 Organización	91
5.4.4 Infraestructura	92
5.4.5 Corredor Insurgentes: Línea 1 del Metrobús	92
<b>6. Diseño y análisis de métodos de optimización de los servicios de Autobuses de Tránsito Rápido: Aplicación a la Línea 1 del Metrobús en la Ciudad de México</b>	
6.1 Definición del problema	99
6.2 Metodología y fuentes	100

6.3	Justificación del análisis	109
6.4	Planteamiento del modelo	111
6.5	Notaciones y definiciones	112
6.6	Funciones objetivo	115
6.7	Representación de las soluciones y cálculo de los objetivos correspondientes	116
6.8	Procedimientos de solución: procedimientos constructivos	122
6.9	Procedimientos de mejora: búsqueda local y búsqueda tabú	131
6.10	Instancia real y generación de instancias pseudoreales	138
6.11	Pruebas para analizar las fases del procedimiento constructivo	141
6.12	Pruebas con búsqueda local	154
6.13	Pruebas con búsqueda tabú	158
6.14	<i>MultiStartTabu</i>	161
6.15	Análisis de las soluciones en la instancia real	164
6.16	Conclusiones del modelo	169
6.17	Apéndice: Solución, representación y cálculo de objetivos	170
<b>7.</b>	<b>Enfoque multiobjetivo: Análisis y diseño de métodos de solución</b>	
7.1	Introducción	177
7.2	Notaciones y definiciones	179
7.3	Estrategia para el modelo biobjetivo	179
7.4	Aceleración: Movimiento por índices	183
7.5	Algoritmo NSGA II: Conceptos iniciales	191
7.6	Descripción de algoritmo NSGA II	193
7.7	El ordenamiento no dominado	195
7.8	Adaptación a nuestro modelo	196
7.9	Pruebas computacionales: Resultados de las tres fases de MOAMP	201
7.10	Movimientos por índices. Efecto en el tiempo de computación	204
7.11	Comparación de MOAMP con NSGA II	205
7.12	Conclusiones del método	210
7.13	Recomendaciones para mejorar los servicios del transporte urbano del Metrobús	211

7.14. Apéndice. Aspectos técnicos sobre programación y tiempos de computación	214
<b>8. Comentarios Finales</b>	
8.1 Extensiones y limitaciones	219
8.2 Conclusiones	223
8.3 Reflexiones	229
8.4 Trabajo futuro	230
<b>Referencias Bibliográficas</b>	235

**CAPITULO 1:**  
**INTRODUCCIÓN**



## **1.1 Descripción del problema**

En los últimos años, el aumento de la demanda de transporte y del tránsito vial ha causado, sobre todo en las grandes ciudades, mayor congestión, demoras, accidentes y problemas ambientales. La congestión del tránsito, ha afectado tanto a automovilistas como a usuarios del transporte público, acarreando pérdida de eficiencia económica y otros efectos negativos para la sociedad, siendo una amenaza para la calidad de vida urbana. La creciente disponibilidad de automóviles ha permitido una mayor movilidad individual que, sumada al crecimiento de la población de las ciudades y a la escasa aplicación de políticas estructuradas de transporte urbano, ha potenciado la congestión. Aunque la mayor movilidad individual, facilitada por el automóvil, pueda considerarse positiva, tiene como contra partida un uso más intensivo del espacio destinado a la circulación. La consecuencia más evidente de la congestión es el incremento de los tiempos de viaje, especialmente en las horas pico, que alcanza, en algunas ciudades, niveles bastante superiores a los considerados aceptables (Bull, 2003, 19).

Aunado a lo anterior, deben agregarse otros importantes efectos perjudiciales, tales como mayor cantidad de accidentes, aumento del consumo de combustibles en el transporte y, en general, los costes operacionales de los vehículos. El crecimiento del parque vehicular ha reducido la velocidad promedio de los desplazamientos, generando un mayor consumo de combustible por kilómetro recorrido e incrementando los tiempos de traslado. Esto ha propiciado desorden en el transporte y saturación de las vialidades, conduciendo hacia un colapso vial. En algunos lugares, ante la ausencia de un sistema de transporte público eficiente y confiable, un sector de la población ha resuelto sus necesidades de movilidad, adquiriendo un automóvil con pobres resultados (Bull, 2003, 20).

La situación empeora, a partir del hecho de que la congestión perjudica no sólo a los automovilistas, sino también a los usuarios del transporte colectivo. Dichos usuarios, en los países en vías de desarrollo, son personas de ingresos menores, que se ven afectados por el aumento en sus tiempos de viaje y en el valor de los pasajes.

En el caso del Distrito Federal, se han utilizado diversos sistemas de transporte, desde las canoas, que se empleaban en la época prehispánica, para transportar bienes y personas a través de los canales, hasta llegar al actual sistema, compuesto por una combinación de transportes subterráneos, de superficie, de combustión interna y eléctrica. Hasta finales de los años sesenta, los viajes se realizaban en tranvías; que, para ese momento, ya eran vehículos viejos y en autobuses de propiedad privada. Ante el crecimiento poblacional, que se presentaba en esa época, la oferta de transporte público resultaba insuficiente. Es por eso que empezó a incrementarse, de manera considerable, el parque vehicular. Adicionalmente, a partir del año 1967 comenzó la planeación y la construcción de un nuevo sistema de transporte subterráneo masivo. Éste culminó en el año 1969, con la inauguración de la primera línea del Sistema de Transporte Colectivo Metro (STCM). Esto ocasionó que los operadores de los autobuses entraran en un proceso de renovación de unidades, con el fin de poder captar la demanda restante y brindar al STCM, la conectividad con las zonas más alejadas de la ciudad. En el año 1975 se introdujeron los primeros autobuses para transporte de pasajeros de alta capacidad, que trasladaban a setenta personas al mismo tiempo, los cuales funcionaban con diesel. Sin embargo, factores como el subsidio al coste del viaje en el STCM, originó que en el año 1981 se revocaran todas las concesiones individuales, para la prestación del servicio de transporte urbano de pasajeros en autobuses. Esto originó que se creara un organismo descentralizado denominado Autotransportes Urbanos de Pasajeros Ruta 100, con el objetivo de brindar el servicio de transporte público de pasajeros en el Distrito Federal y en la zona metropolitana, que antes prestaban los operadores privados (Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal, 2013, 63).

En el año 1994 se creó la actual Secretaría de Transportes y Vialidad y hacia el año 1995 la Ruta 100 se declaró en quiebra, proceso que concluyó en el año 1997. Ese año se publicó la declaratoria de necesidad para la expedición de 3.640 concesiones a organizaciones para operar las rutas de transporte público de pasajeros, en las modalidades individual y colectiva, en el Distrito Federal y su zona metropolitana. La finalidad era dar un servicio de transporte efectivo, que conectara la red del STCM con las zonas alejadas, que anteriormente eran cubiertas por la Ruta 100 (Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal, 2013, 65).

En el año 2002, EMBARQ-The World Resources Institute Center for Sustainable Transport firmó un acuerdo con el gobierno del Distrito Federal, para formalizar un compromiso de cooperación por cinco años, para aplicar el Programa para el Transporte Sustentable en la Ciudad de México. Como resultado del acuerdo se creó el Centro de Transporte Sustentable de la Ciudad de México, con fondos del *Global Environmental Fund* y la *Shell Foundation*. Se dio a conocer a la prensa, el inicio de las pláticas entre las autoridades del Distrito Federal y el Estado de México, para la construcción de un sistema de corredores de autobuses rápidos, que posteriormente se denominaría Metrobús. El modelo propuesto tendría características similares al sistema TransMilenio de la ciudad de Bogotá. En el año 2004 comenzaron las obras de construcción de la Línea 1, para que a mediados del año 2005, ésta entrara en operación.

Tal y como se explicará más adelante, el Metrobús pertenece al sistema de Autobuses de Tránsito Rápido (*Bus Rapid Transit*, BRT por sus siglas en inglés). Dicho sistema se ha puesto en práctica, con bastante éxito, en muchas ciudades del mundo (Bogotá, Guadalajara, Lima, Curitiba, Hamburgo, Los Ángeles, Sao Paulo, Las Vegas y Beijing, entre otras). Las ventajas del sistema son la comodidad, la rapidez, la protección al medio ambiente, la facilidad a la inter-modalidad, el escaso impacto visual y la mejora en el nivel del servicio. No obstante, se ha observado una sobresaturación de la demanda de este servicio, provocando cuellos de botella, en determinadas estaciones y trenes. Como consecuencia, se observa una disminución de la velocidad media de los autobuses; en algunos casos, más que representativos (de veinte a seis kilómetros por hora) en la Línea 1.

Cabe destacar que la movilidad conecta diversas temáticas, entre las que destacan la configuración de un sistema de transporte integrado, el fomento de alternativas no motorizadas al transporte, las afectaciones por la construcción de obras de movilidad, la accesibilidad universal para personas con discapacidad o movilidad reducida, el fomento de facilidades para peatones y ciclistas; la existencia y el mantenimiento de paraderos, banquetas, alumbrado público, áreas verdes y demás áreas públicas; el acceso a información sobre las distintas rutas y opciones de movilidad y la libre circulación, entre otras. Cuando la movilidad de la población se dificulta, la urbe entera es la que se ve

afectada en su funcionamiento y en su productividad; y más aún, en su convivencia (Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal, 2013, 139).

Con este proyecto se pretende rediseñar algunos elementos de las líneas de BRT: frecuencias, horarios, tamaño de la flota, rediseño de líneas; con el fin de mejorar el nivel del servicio (tiempos de espera y tiempos de recorrido), y posteriormente el número de trasbordos.

En cuanto a la metodología, se va a diseñar un método heurístico “ad hoc”, basado en búsqueda tabú para este problema biobjetivo (mejora del nivel de servicio y del número de trasbordos).

## **1.2 Motivación**

La gestión empresarial en el sector transporte ha presentado muchos cambios en las últimas décadas. Las organizaciones pertenecientes a dicho sector, deben formular y establecer, de manera detallada, sus prioridades y estrategias al momento de tomar decisiones y de proveer sus servicios al mercado. Todos los días se toman decisiones, mismas que afectan las operaciones habituales y el porvenir futuro, los escenarios y las condiciones son diferentes, ya sea de certidumbre o incertidumbre, dependiendo del riesgo implícito en cada decisión y de la probabilidad de llegar a un resultado adecuado. Muchos son los problemas que se deben resolver, aunque algunos de ellos son difíciles de remediarse y no por ello deben dejarse sin solución.

Son distintos los retos que enfrenta el sector transporte, con el fin de cumplir las expectativas del usuario; sobre todo en cuanto a la calidad del servicio. En muchos de los casos, no se conocen con exactitud las expectativas ni las percepciones que tienen los usuarios sobre los servicios recibidos, por lo que no se puede conocer la evolución de los mismos, en el transcurso del tiempo. Ante esto, es necesario buscar todas las vías posibles para conocer sus necesidades y su satisfacción con el servicio, para medir el desempeño empresarial y crear una herramienta de apoyo para la toma de decisiones. Por otra parte, la presencia de distintas alternativas de transporte, cada vez más innovadoras, capaces de

proponer experiencias mejoradas y diferentes, es lo que ha llevado a comprender que el reto no consiste únicamente en mantenerse en el mercado, sino en pensar de qué manera se puede convertir en protagonista de las preferencias de los usuarios.

Un problema cada vez mayor, al cual se enfrentan las organizaciones del sector transporte, es la movilidad. El transporte debe satisfacer el deseo de movimiento de las personas; lo cual ha constituido una situación de gran importancia estratégica para el sector. Ante el crecimiento de las ciudades, se ha emprendido la búsqueda de una movilidad más rápida y cómoda para los usuarios. Esto ha conllevado a ampliaciones en la red de transporte público existente y dado lugar a realizar una toma de decisiones en cuestiones como planificación del tráfico, análisis del entorno urbano, tiempos de recorrido y respeto por el medio ambiente, entre otros. Las decisiones de viaje dependen consistentemente del precio, del tiempo del recorrido, de la regularidad y de la comodidad; los cuales deben describirse de una forma integral.

Existe una necesidad, cada vez mayor, de políticas públicas de movilidad y de transporte, que contemplen medidas de planificación territorial y urbana; y que busquen satisfacer las diferentes necesidades de movilidad de personas y de mercancías. Esto sucede, dado que la movilidad se relaciona con la forma y con la distribución de las zonas, con las funciones urbanas, con el equipamiento disponible y los modos de transporte, con las necesidades y las actividades humanas; y, sobre todo, con las decisiones de los individuos, a partir de la oferta de opciones de tiempos y de movimientos para el transporte. En el siglo 21, las distancias disminuyen a escala internacional, mientras que aumentan a escala local (la expansión de las ciudades ha aumentado las distancias de los viajes motorizados internos, no sólo en kilómetros, sino también en tiempo); mientras que el transporte público puede ser suministrado tanto por empresas públicas como por privadas, y comprende los medios de transporte en que los pasajeros no son los propietarios de los mismos, resultando ser un servicio suministrado por terceros (Duque, 2007, 1-2).

Una manera de solucionar el problema de la movilidad y de reducir el tiempo de traslado ha sido la implementación de sistemas de transporte masivo, tales como el sistema BRT. Este

sistema conlleva un proceso de planeación muy cuidadoso, que debe considerar diversos factores, tales como: las infraestructuras existentes, las disposiciones legales, las estructuras demográficas, la demanda existente, las expectativas de los municipios y los operadores. Dicha planeación presume la toma de decisiones respecto a infraestructuras, vehículos, Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transportation Systems*, ITS, por sus siglas en inglés) y cobro de pasajes, entre otros.

La movilidad urbana está teniendo un protagonismo creciente, ya que es un asunto de vital importancia para la vida de la población, sigue siendo imprescindible el trasladarse de un lugar a otro para llevar a cabo las actividades cotidianas y de ahí la necesidad de una configuración de sistemas de transporte que garantice mejorar la movilidad de los viajeros de una manera sostenible, segura y de calidad. En el caso de la Ciudad de México, la implementación de sistemas de transporte como el Metrobús, la calidad en el servicio prestado se hace imprescindible. La demanda del servicio por parte de la población es cada vez mayor, lo que ha conllevado a su éxito, que asimismo dado lugar a problemas en su operación.

Dichos problemas de operación han provocado deficiencias en la calidad, que se traducen en aumentos en el tiempo total de viaje, en el tiempo de espera y en el número de trasbordos. Entre los usuarios se aprecia negativamente el tiempo de espera que el tiempo total de viaje, pese a que el primero forma parte del segundo. Asimismo, el número de los trasbordos es una medida de la calidad del servicio, ya que al ser demasiado alto no es bien percibido por parte del usuario. Depende el tipo de usuario que utilice el servicio, la toma de decisiones con respecto a los trasbordos variará, ya que aquellas personas con dificultades de movilidad, en ocasiones prefieren no realizar ningún trasbordo, aunque el tiempo de viaje sea más alto, mientras que para los usuarios jóvenes, el número de los mismos no sea relevante debido a que no presentan problemas de movilidad.

Ante la problemática anterior, la tesis muestra la necesidad de una reestructuración operativa en la línea más utilizada del sistema BRT en el Distrito Federal y su zona conurbada, sobre todo en lo que respecta al tiempo total de viaje y el número de trasbordos,

ya que son dos medidas fundamentales de la calidad del servicio. Se pretenden generar propuestas de solución para racionalizar la toma de decisiones respecto al funcionamiento y operación del Metrobús con el fin de solucionar de la manera más eficiente el problema de operación actual, que radica en la saturación de la red existente.

### **1.3 Objetivos**

El principal objetivo es el diseño de un método metaheurístico, basado en búsqueda tabú, para el problema del transporte BRT en el Distrito Federal, con un par de objetivos. Otros aspectos secundarios abarcan el análisis y la comparación con otros metaheurísticos, que tratan los problemas biobjetivo, y ver, hasta qué punto, esta estrategia “ad hoc” es mejor. Así mismo, otro importante objetivo es la adaptación de este método a otros problemas similares.

La investigación propone aplicar técnicas metaheurísticas a problemas de optimización reales, surgidos en el sector transporte, particularmente en la operación de modos alternativos de transporte, como el BRT, analizando distintas posibilidades para sacar el máximo partido a dichas técnicas y para ofrecer una buena solución. Se han desarrollado metaheurísticas avanzadas, que abarcan la optimización biobjetivo. El primer caso está motivado por la naturaleza biobjetivo del problema de optimización, de la operación del sistema de transporte BRT, en los que existen varias funciones contrapuestas, que se han de optimizar a la vez.

Asimismo, se pretende estudiar el problema de diseño de ruta, tomando en cuenta la afectación de los tiempos de los recorridos de los usuarios de una de las líneas del sistema BRT, ocasionado por la saturación en la demanda de viajeros. Esto ha provocado largas filas de espera, para poder acceder al servicio.

## **1.4 Contribución científica**

La contribución científica de la presente investigación radica en la modelación matemática del problema de optimización de ruteo, de una de las líneas del sistema BRT, con flexibilidad en los tiempos de recorrido, desde la perspectiva biobjetivo. A su vez, se pretende el diseño de la mejor solución para el congestionamiento de la red de la Línea 1, a través del uso de metaheurísticos, tales como la búsqueda tabú.

Se pretende describir la metaheurística, búsqueda tabú, utilizando los criterios de optimalidad global y de búsqueda local. El primero se refiere al traslado eficiente de los pasajeros de la Línea 1 del Metrobús. Por otro lado, el segundo se refiere a cubrir el crecimiento de la demanda, proyectado para los próximos años; y lograr mantener la velocidad promedio de cada autobús en veinte kilómetros por hora, y no en base a seis kilómetros por hora, como usualmente sucede. A su vez, la incorporación a la descripción de conceptos tales como la memoria adaptativa y la exploración responsiva. La memoria adaptativa abarca el espacio de las siguientes posibles soluciones: aumentar la frecuencia de los autobuses, optimizar los horarios en horas pico, optimizar los tiempos de recorrido y agregar nuevas rutas dentro de la línea. La exploración responsiva indica que las malas decisiones, en torno al diseño de la ruta y al uso de flota, proporcionan más información, que solamente una buena decisión. El uso de memoria a corto plazo, comprende explorar cambios en los horarios de ruta, mientras que la de largo plazo, radica en utilizar el mismo tipo de autobuses, continuar con las mismas frecuencias de paso y continuar con una única ruta.

## **1.5 Estructura de la tesis**

El documento está estructurado en ocho capítulos y referencias bibliográficas. El presente capítulo expone la descripción del problema, la motivación de estudio de dicho problema, los objetivos principales a seguir y la contribución científica. Este capítulo se considera el punto de partida de la investigación.

En el capítulo dos se presentan las técnicas de solución de problemas de optimización combinatoria, exponiendo los métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos. De estos últimos se hará mención de la búsqueda local, de la búsqueda tabú, de la Búsqueda por Entornos Variables (*Variable Neighborhood Search*, VNS, por sus siglas en inglés), del temple o recocido simulado, de las colonias de hormigas, de los algoritmos meméticos, entre otros.

En el capítulo tres se expondrán los metaheurísticos para problemas multiobjetivo, entre ellos los métodos basados en poblaciones y los métodos escalares. Asimismo, también se hablará de los enfoques para solucionar dicho tipos de problemas. En el capítulo cuatro, se presentan los problemas existentes en el campo del transporte urbano, haciendo énfasis en el problema de ruta y de transporte urbano.

En el capítulo cinco se muestran las necesidades de movilidad en la Ciudad de México, exponiendo al sistema BRT, como una alternativa de transporte público, mencionando las experiencias internacionales que ha tenido a lo largo de los últimos años. A su vez, se describe al Metrobús, como parte de dicha alternativa, explicando sus características y haciendo énfasis en la Línea 1, objeto de estudio de la investigación.

En el capítulo seis se presenta la problemática actual de la Línea 1 del Metrobús y se expone el modelo matemático, con los resultados computacionales, para evaluar el desempeño del algoritmo propuesto, basado en el algoritmo metaheurístico.

En el capítulo siete se presenta el diseño de un método de solución para el modelo analizado en el capítulo seis pero considerando dos objetivos. Asimismo, se presentan recomendaciones de política pública, con el fin de mejorar y de optimizar el servicio de dicha línea.

En el capítulo ocho se comentan las conclusiones generales de la presente investigación, las reflexiones pertinentes y el trabajo futuro que puede derivarse. Finalmente se enumeran las referencias bibliográficas consultadas.



**CAPITULO 2:**  
**HEURÍSTICA EN OPTIMIZACIÓN**



## 2.1 Técnicas de solución de los problemas de optimización combinatoria

Optimizar significa poco más que mejorar. En el contexto científico, la optimización es el proceso de tratar de encontrar la mejor solución posible, para un determinado problema. En un problema de optimización, existen diferentes soluciones y un criterio para discriminar entre ellas. El objetivo consiste en encontrar la mejor solución. Estos problemas se pueden expresar como la búsqueda del valor, de unas variables de decisión, para las que una determinada función objetivo alcanza su valor máximo o mínimo. En ocasiones, el valor de las variables está sujeto a unas restricciones. Existe una infinidad de problemas teóricos y prácticos que involucran a la optimización. Algunas clases de problemas de optimización son relativamente fáciles de resolver. Éste es el caso, por ejemplo, de los problemas lineales continuos, en los que tanto la función objetivo como las restricciones son expresiones lineales y las variables son continuas. Estos problemas pueden ser resueltos con el conocido método Simplex, publicado por Dantzig en 1947. Sin embargo, muchos otros tipos de problemas de optimización son muy difíciles de resolver. De hecho, la mayor parte de los que podemos encontrar en la práctica, entran dentro de esta categoría (Martí, 2003, 1).

Se puede decir que un problema de optimización difícil es aquél para el que no se puede garantizar el encontrar la mejor solución posible, en un tiempo razonable. La existencia de una gran cantidad y variedad de problemas difíciles, que aparecen en la práctica y que necesitan ser resueltos de forma eficiente, impulsó el desarrollo de procedimientos eficientes, para encontrar buenas soluciones, aunque no fueran óptimas. Estos métodos, en los que la rapidez del proceso es tan importante como la calidad de la solución obtenida, se denominan heurísticos o aproximados. Este término deriva de la palabra griega *heuriskein*, que significa encontrar o descubrir; y se usa en el ámbito de la optimización, para describir una clase de algoritmos de resolución de problemas (Martí, 2003, 2).

En Díaz, et al (1996) se recogen varias definiciones diferentes del algoritmo heurístico, destacando la siguiente: “un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido, mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente, para obtener una buena solución”

(Martí, 2003, 2). Por otra parte, Newell, Shaw y Simon (1963) dieron la siguiente definición: “Un proceso que puede resolver un problema dado, pero que no ofrece ninguna garantía de que lo hará, se llama una heurística para ese problema” (Malagón, 2012, 3). La popularización del concepto se debe al matemático George Polya, quien da algunos procedimientos heurísticos para resolver problemas matemáticos e indicó que si no se consigue entender un problema, se dibuja; si no se encuentra la solución, se actúa como si ya se tuviera y se trata de ver qué se puede deducir de ella (razonando hacia atrás). Si el problema es abstracto, se debe examinar un ejemplo concreto y tratar primero con un problema más general (Huamán, 2008, 1).

Los procedimientos heurísticos son acciones que comportan un cierto grado de variabilidad y su ejecución no garantiza la consecución de un resultado óptimo (Bobo Romero, 2009, 5). Por otra parte, Duhalde y González (1997) señalan que un heurístico es un procedimiento que ofrece la posibilidad de seleccionar estrategias, que nos acercan a una solución (Alamilla, 2010, 29).

En contraposición a los métodos exactos, que proporcionan una solución óptima del problema, los métodos heurísticos se limitan a proporcionar una buena solución del problema, no necesariamente óptima. Los problemas de optimización combinatoria tienen como objetivo encontrar el máximo (o el mínimo) de una determinada función, sobre un conjunto finito de soluciones, que denotaremos con la  $S$ . No se exige ninguna condición o propiedad sobre la función objetivo o la definición del conjunto  $S$ . Es importante notar que dada la finitud de  $S$ , las variables han de ser discretas, restringiendo su dominio a una serie finita de valores. Habitualmente, el número de elementos de  $S$  es muy elevado, haciendo impracticable la evaluación de todas sus soluciones, para determinar el óptimo (Martí, 2003, 2).

A continuación se expondrá una breve introducción a los métodos exactos y a los métodos heurísticos; y, posteriormente, se explicarán los métodos y las aplicaciones específicas para los problemas multiobjetivo.

### **2.1.1 Métodos exactos**

Son aquellos que permiten encontrar la solución óptima, a un determinado problema. Dada la complejidad de la mayoría de los problemas, sólo las instancias, con pocos clientes, pueden ser resueltas a través de los métodos exactos. La mayoría de los algoritmos se basan en procesos de ramificación y de acotamiento. Hasta finales de los años ochenta, éstos eran los métodos más efectivos, que se basaban en relajaciones combinatorias. En las últimas décadas se han propuesto relajaciones langrangianas, que han aumentado el tamaño de los problemas que se pueden resolver (García, 2010, 21).

Dichos algoritmos consisten en que a partir del conjunto de todas las soluciones, se debe dividir dicho conjunto en dos subconjuntos o ramas; y se debe calcular y asignar a cada rama, una cota inferior (si se está minimizando) y una cota superior (si se está maximizando), del valor de la función objetivo, en ese conjunto de soluciones. Debe elegirse una de las ramas o subconjuntos, según algún criterio, y realizar de nuevo el paso anterior. El proceso debe repetirse hasta llegar a una única solución (Crespo; et al, 2007, 8).

Los criterios de ramificación y de elección del siguiente subconjunto, que se explora, y la forma en que se determinan las cotas, dependen de la estructura y de las características propias de cada problema en particular. Además, son importantes para aumentar la eficacia de estos algoritmos. Existen otros métodos desarrollados, como el algoritmo de plano de corte de Gomory o el de descomposición de Benders (Crespo; et al, 2007, 8-9).

Por otra parte, existen otros tipos de problemas de optimización relativamente fáciles de resolver. Éste es el caso de los problemas lineales continuos, en los que, tanto la función objetivo como las restricciones, son expresiones lineales y las variables son continuas (Gómez, 2010, 14).

### 2.1.2 Heurísticos

Existen muchas razones para la utilización de métodos heurísticos, además de la dificultad del problema a resolver. El problema es de una naturaleza tal, que no se conoce ningún método exacto para su resolución; y aunque existe un método exacto para resolver el problema, su uso puede llegar a ser computacionalmente costoso. Por otra parte, el método heurístico es más flexible que un método exacto, permitiendo la incorporación de condiciones de difícil modelización. El método heurístico se utiliza como parte de un procedimiento global, que garantiza el óptimo de un problema, existiendo dos posibilidades. La primera posibilidad se centra en que el método heurístico proporciona una buena solución inicial de partida. Y la segunda posibilidad se refiere a que participa en un paso intermedio del procedimiento, como por ejemplo: las reglas de selección de la variable a entrar, en la base en el método Simplex.

Algunas definiciones de heurística, extraídas de la literatura, son las siguientes: T. Nicholson (1971) la define como “procedimiento para resolver problemas, por medio de un método intuitivo, en el que la estructura del problema puede interpretarse y explotarse inteligentemente, para obtener una solución razonable”. Russell, et al (1996) mencionan que “actualmente, el término heurística se utiliza más bien como adjetivo, para referirse a cualquier técnica que permita mejorar el desempeño del caso promedio, en una tarea de resolución de problemas, aunque no necesariamente permita mejorar el desempeño del peor de los casos. Específicamente, en el área de los algoritmos de búsqueda, se refiere a una función mediante la cual se obtiene una estimación del coste de una solución”. Zanakis, et al (1981) la definen como “procedimientos simples, a menudo basados en el sentido común, que se supone que obtendrán una buena solución (no necesariamente óptima) a problemas difíciles, de un modo sencillo y rápido” (Rodríguez, 2010, 13-14).

Los algoritmos heurísticos dependen, en gran medida, de un problema concreto para el que se han diseñado. En otros métodos de resolución de propósito general, como pueden ser los algoritmos exactos de ramificación y de acotación, existe un procedimiento conciso y preestablecido, independiente, en gran medida, del problema abordado. En los métodos

heurísticos esto no es así. Las técnicas e ideas aplicadas a la resolución de un problema son específicas de éste y aunque, en general, pueden ser trasladadas a otros problemas, han de particularizarse en cada caso. Es por esto, que es necesario referirse a un problema concreto, para estudiar con detalle los procedimientos heurísticos (Martí, 2003, 2).

Cabe destacar que existen muchos métodos heurísticos, cuya naturaleza es muy distinta. Muchos de ellos han sido diseñados para un problema en específico, sin la necesidad de que se puedan aplicar a otros problemas similares. Algunos de los heurísticos más conocidos son los métodos de descomposición, los métodos inductivos, los métodos de reducción, los métodos constructivos y los métodos de búsqueda local.

En los métodos de descomposición, el problema original se descompone en sub-problemas más sencillos de resolver, teniendo en cuenta, aunque sea de manera general, que ambos pertenecen al mismo problema. Los métodos inductivos generalizan, de versiones pequeñas o más sencillas, al caso completo, propiedades o técnicas identificadas en estos casos más fáciles de analizar, y que pueden ser aplicadas al problema completo. Los métodos de reducción consisten en identificar las propiedades, que se cumplen mayoritariamente por las buenas soluciones, e introducirlas como restricciones del problema. El objeto es restringir el espacio de soluciones, simplificando el problema; y el riesgo obvio es dejar fuera las soluciones óptimas del problema original. Los métodos constructivos consisten en construir, literalmente paso a paso, una solución del problema. Son métodos deterministas y suelen estar basados en la mejor elección, en cada iteración. En los métodos de búsqueda local, a diferencia de los métodos anteriores, los procedimientos de búsqueda o mejora local comienzan con una solución del problema y la mejoran progresivamente. El procedimiento realiza, en cada paso, un movimiento de una solución a otra, con mejor valor. El método finaliza cuando, para una solución, no existe ninguna solución accesible, que la mejore (Martí, 2003, 2).

Si bien todos estos métodos han contribuido a ampliar el conocimiento para la resolución de problemas reales, los métodos constructivos y los de búsqueda local constituyen la base de los procedimientos metaheurísticos (que se definirán más adelante). Es importante

mencionar que frente a los heurísticos, el tiempo que los métodos exactos puedan precisar, para resolver un problema muy complejo (en caso de existir alguna solución) es de un orden de magnitud muy superior al de los heurísticos, pudiendo darse el caso de no encontrarla.

Tanto los métodos heurísticos, como los exactos, intentan encontrar el máximo o el mínimo de una función objetivo, sobre un conjunto finito de soluciones, denotadas por  $S$ :

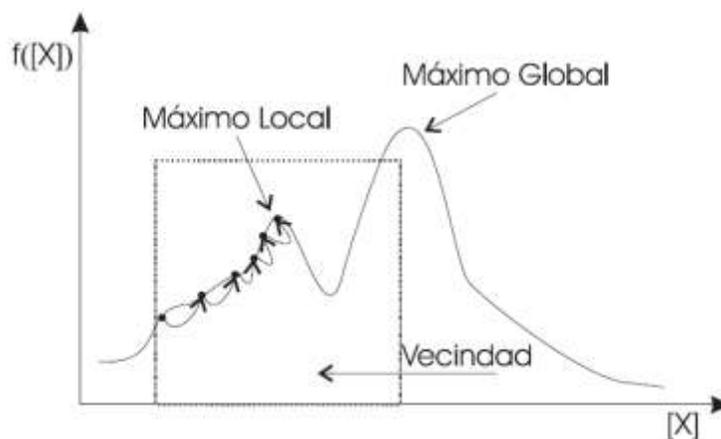
$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & \text{sujeto a: } s \in S \end{aligned}$$

Es importante destacar que no se exige ninguna condición o propiedad sobre la función objetivo o sobre la definición del conjunto. Además, puesto que las variables son discretas y, generalmente acotadas,  $S$  es finito. Es decir, su dominio queda restringido a una serie finita de valores. Existen otras razones que justifican el empleo de los métodos heurísticos. Entre ellas se encuentran: que no siempre se conocen los parámetros de la función objetivo; que el método heurístico aporta una flexibilidad mayor a la hora de modelizar un problema; y que no siempre es posible incorporar todos los aspectos, en el modelo matemático (Gómez, 2010, 14).

En un problema de optimización combinatoria, cada solución presenta un conjunto de soluciones asociadas a ella, denominadas entorno de  $s$ , y que se denota como  $N(s)$ . Se parte de una solución inicial  $s_0$ , se calcula su entorno  $N(s_0)$  y se escoge una nueva solución  $s_1$  mejor que  $s_0$ , se sustituye  $s_0$  por  $s_1$  y así sucesivamente. La sustitución de una solución, por otra vecina, se denomina movimiento. La definición de entorno depende, en gran medida, de la estructura del problema, así como de la función objetivo. Así mismo, se debe definir el criterio para seleccionar una nueva solución del entorno. Según lo anterior, puede buscarse la mejor solución de  $N(s)$  o tomar la primera solución de  $N(s)$  que mejore la función (Gómez, 2010, 15).

Los algoritmos heurísticos presentan un gran problema, el cual radica en su incapacidad para escapar de los óptimos locales. En la figura 1 se muestra cómo, para una vecindad dada, el algoritmo heurístico, basado en un método búsqueda local, se queda atrapado en un máximo local. Los algoritmos heurísticos no poseen ningún mecanismo que les permita escapar de los óptimos locales. Para solventar este problema, se introducen otros algoritmos de búsqueda más inteligentes, que eviten, en la medida de lo posible, quedar atrapados en los óptimos locales. Estos algoritmos de búsqueda más inteligentes se denominan metaheurísticos. Dichos algoritmos son procedimientos de alto nivel, que guían a los algoritmos heurísticos conocidos, evitando que éstos caigan en los óptimos locales.

**Figura 1**  
**Función multimodal\***



\* Suele acarrear el encasillamiento de los algoritmos heurísticos en óptimos locales.

Fuente: Rodríguez, Carlos; “*Algoritmos heurísticos y metaheurísticos para el problema de localización de regeneradores*”, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, Universidad Rey Juan Carlos, España, 2010.

### 2.1.3 Metaheurísticos

En los últimos años, han aparecido una serie de métodos, bajo el nombre de metaheurísticos (Glover, 1986), con el propósito de obtener mejores resultados, que los alcanzados por los heurísticos tradicionales. Los procedimientos metaheurísticos se sitúan conceptualmente “por encima” de los heurísticos, en el sentido que guían el diseño de éstos. Así, al

presentarse un problema de optimización, se puede escoger cualquiera de estos métodos, para diseñar un algoritmo específico, que lo resuelva aproximadamente.

Para Glover (1997) y Laguna (2003) “Metaheurística se refiere a una estrategia maestra que guía y modifica otras heurísticas, para producir soluciones más allá de aquellas que normalmente se generan en una búsqueda de óptimos locales”. Así mismo, los profesores Osman y Kelly (1996) introdujeron la siguiente definición “los procedimientos metaheurísticos son una clase de métodos aproximados, que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Los metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos, combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos”.

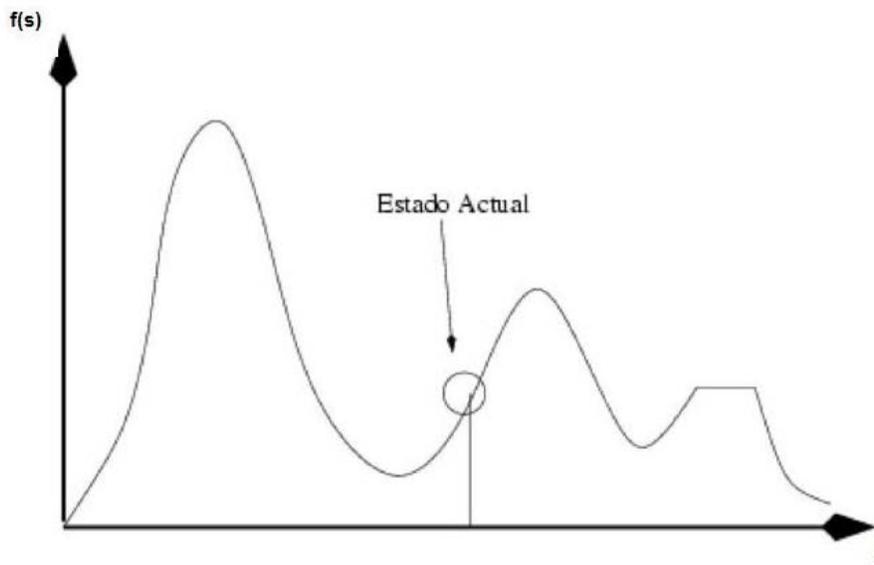
Cabe destacar que en las metaheurísticas se intenta explorar, de una forma más profunda, las regiones más prometedoras del espacio de soluciones, combinando búsquedas locales y recombinación de soluciones parciales. Una diferencia importante, con las heurísticas clásicas, es que puede aceptar un pequeño empeoramiento de la función objetivo, con la intención de conseguir, posteriormente, un beneficio mayor y escapar de los mínimos locales, en los cuales pudiera quedar atrapado el algoritmo. La calidad de las soluciones proporcionadas por estos métodos es generalmente bastante mayor que la de las soluciones obtenidas con las heurísticas clásicas, a cambio de mayor tiempo de cómputo y de mayor complejidad algorítmica. Uno de los componentes más importantes, dentro de las metaheurísticas, es la búsqueda local. Esto es, explorar localmente el entorno de una solución, buscando mejores soluciones (García, 2010, 27).

### **2.1.3.1 Búsqueda local**

Como se ha explicado anteriormente, es un método que se basa en la idea de explorar las soluciones vecinas, de aquella que se tiene en un momento dado. Se trata de pasar de una solución, a otra vecina, que sea mejor. El proceso se acaba cuando no hay mejora posible en el conjunto de soluciones vecinas. Dichas soluciones pueden ser más sencillas o más

sofisticadas, dependiendo de la estructura vecinal que se defina. Para diseñar un procedimiento de búsqueda local, es necesario definir previamente un vecindario o entorno  $N(s)$ . Éste representa a un conjunto de soluciones vecinas de  $s$ , a las que se llega por un pequeño movimiento o cambio de  $s$  (Crespo; et al, 2007, 10).

**Figura 2**  
**Búsqueda local**



Fuente: Ceccaroni, Luigi. *“Inteligencia artificial: búsqueda local”*, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2009.

Las formas más usuales para seleccionar la solución vecina son explorar, en todo el vecindario, y tomar la mejor solución, según el valor de la función objetivo (mayor descenso); o en su caso, buscar y seleccionar la primera, que mejora la solución actual (primer descenso). El problema que tiene esta estrategia, que es siempre descendente, es que, en la mayoría de los casos, se convergen a mínimos locales que no son globales, y además suelen estar muy lejos del óptimo local (Crespo; et al, 2007, 11).

La búsqueda local es una búsqueda que podemos denominar como ciega. Es decir, el único criterio para aceptar una solución es que reduzca el valor de la función objetivo; por lo que no utiliza ninguna información recogida durante la ejecución del algoritmo y depende, en

gran medida, de la solución inicial y del mecanismo de generación de entorno (Crespo; et al, 2007, 11).

### **2.1.3.2 Búsqueda tabú**

Se le considera como una metaheurística que guía un procedimiento heurístico de búsqueda local, en la búsqueda de optimalidad global. Busca derivar y explorar una colección de estrategias inteligentes, para resolver problemas basados en procedimientos implícitos y explícitos de aprendizaje. No sólo explora la historia del proceso de resolución de un problema, sino que exige la creación de estructuras, para hacer posible la explotación. De esta manera, los elementos prohibidos tienen este estatus, por la confianza de una memoria evolutiva, que altera este estado, en función del tiempo y de las circunstancias.

Para clasificar el procedimiento de resolución, como inteligente, debe incorporar dos características. La primera es la memoria adaptativa y la segunda es la exploración responsiva. La memoria adaptativa implementa procedimientos capaces de realizar la búsqueda, en el espacio de soluciones, eficaz y eficientemente. Las decisiones locales están guiadas por la información obtenida en el proceso de búsqueda. La búsqueda tabú contrasta con diseños que confían en procesos semi-aleatorios y con típicos diseños de memoria rígida (ramificación y acotación).

La exploración responsiva se refiere a que una mala elección estratégica, proporciona más información, que una buena elección hecha al azar. Esto sucede, porque una mala elección estratégica, da pistas útiles sobre cómo guiar la búsqueda, a zonas más prometedoras. Por una parte, integra los principios de búsqueda inteligente; y por otra parte, explota las características de las soluciones buenas y de las regiones prometedoras.

El término de búsqueda tabú fue introducido en el año 1986 por Fred Glover, en el artículo “*Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence*”, en el cual también introdujo el término metaheurística. Los principios fundamentales de la búsqueda fueron elaborados en una serie de artículos de finales de los años ochenta y principios de

los años noventa, que fueron luego unificados en el libro “*Tabu Search*”, en 1997 (Crespo; et al, 2007, 29).

Las estructuras de memoria de la búsqueda tabú funcionan mediante referencia a cuatro dimensiones principales, consistentes en la propiedad de ser reciente, en frecuencia, en calidad y en influencia. Las memorias basadas en lo reciente y en frecuencia, se complementan la una a la otra, para lograr el balance entre intensificación y diversificación, que todo proceso de búsqueda heurística debe poseer. La dimensión de calidad hace referencia a la habilidad, para diferenciar la bondad de las soluciones visitadas, a lo largo del proceso de búsqueda. La cuarta dimensión de memoria, referida a la influencia, considera el impacto de las decisiones tomadas durante la búsqueda, no sólo en lo referente a la calidad de las soluciones, sino también en lo referente a la estructura de las mismas. Asimismo, el uso de memoria en la búsqueda tabú es tanto explícita como implícita. En el primer caso, se almacenan en la memoria soluciones completas, generalmente soluciones élite, visitadas durante la búsqueda; mientras que en el segundo caso, se almacena la información, sobre determinados atributos de las soluciones, que cambian al pasar de una solución a otra (Crespo; et al, 2007, 30-31).

Otros dos elementos importantes, en el proceso de búsqueda tabú, son las estrategias de intensificación y de diversificación. Las primeras se basan en la modificación de reglas de selección, para favorecer la elección de buenas combinaciones de movimientos y de las características de las soluciones encontradas. Las segundas tratan de conducir la búsqueda a zonas del espacio de soluciones no visitadas anteriormente y de generar nuevas soluciones, que difieran significativamente de las ya evaluadas (Crespo; et al, 2007, 31).

### **2.1.3.3 Búsqueda por Entornos Variables (VNS)**

La VNS es una metaheurística para resolver problemas de optimización, cuya idea básica es el cambio sistemático de entorno, dentro de una búsqueda por entornos. La VNS está basada en cambiar la estructura de entornos, cuando la búsqueda local se estanca en un óptimo local. Se han realizado muchas extensiones, principalmente para permitir la

solución de problemas de gran tamaño. Sin embargo, en la mayoría de ellas, se ha hecho un esfuerzo por mantener la simplicidad del esquema básico.

La VNS está basada en tres hechos simples. El primero se refiere a un mínimo local, con una estructura de entornos, que no lo es necesariamente con otra; el segundo se refiere a un mínimo global, que es mínimo local con todas las posibles estructuras de entornos. El tercer hecho indica que para muchos problemas, los mínimos locales, con la misma o distinta estructura de entornos, están relativamente cerca. Los dos primeros hechos sugieren el empleo de varias estructuras de entornos en las búsquedas locales, para abordar un problema de optimización. El último hecho, constatado empíricamente, indica que los óptimos locales proporcionan información acerca del óptimo global. Las heurísticas, basadas en las variables de VNS, al contrario de lo que ocurre con otras metaheurísticas, se mantienen simples; no sólo en sus esquemas básicos, sino también en la mayoría de las extensiones, requiriendo el ajuste de muy pocos parámetros (Moreno, 2007, 241).

Existen distintos tipo de VNS. Si en una búsqueda local descendente se realiza un cambio de estructura de entornos cada vez que se llega a un mínimo local, se obtiene la Búsqueda por Entornos Variables Descendente. La Búsqueda por Entornos Variables Reducida selecciona al azar soluciones del entorno actual, de la solución actual, cambiando a la siguiente estructura de entornos, si no se obtiene mejora y volviendo a la primera estructura, en otro caso. La VNS es una estrategia que alterna búsquedas locales con movimientos aleatorios, sobre unas estructuras de entornos, que varían de forma sistemática. La Búsqueda por Entornos Variables General se obtiene al sustituir la búsqueda local, de uno de los pasos de la Búsqueda por Entornos Variables Básica, por una Búsqueda por Entornos Variables Descendente. La estrategia de Búsquedas por Entornos Variables Anidados se obtiene a partir de un único movimiento elemental, al que está asociada una estructura de entornos  $N$  (Moreno, 2007, 242-247).

Existen varias estrategias metaheurísticas más, algunas de estas son descritas brevemente en sus adaptaciones a los problemas multiobjetivo como se verá en el siguiente capítulo.

#### **2.1.3.4 Procedimientos de Búsqueda basados en funciones Ávidas, Aleatorias y Adaptativas (GRASP)**

Procedimientos de Búsqueda basados en funciones Ávidas, Aleatorias y Adaptativas (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*, GRASP, por sus siglas en inglés) surgió a finales de los años ochenta en el trabajo de Feo y Resende (1989) y posteriormente, en el año 1995, realizaron una amplia descripción sobre esta técnica metaheurística.

La idea que subyace en esta técnica es que no siempre la mejor elección aparente, en un determinado paso, lleva a la mejor solución final. Es una técnica aleatoria e iterativa, en la que en cada iteración se obtiene una solución al problema que se esté tratando; y, al final, se guarda la mejor solución de todas las iteraciones.

El algoritmo consta de dos fases: en una primera fase se construye de forma inteligente una solución mediante una función ávida, aleatoria y adaptativa. En la segunda fase, se aplica un método de búsqueda local a la solución construida, con la finalidad de encontrar una mejora.

Durante la fase de construcción, en cada paso se va añadiendo un elemento hasta obtener una solución completa. La elección del próximo elemento, en cada iteración, se realiza mediante una función ávida, que mide el beneficio de un elemento, según la función objetivo; y añade la mejor opción, teniendo en cuenta lo que sucede en esa iteración.

Los GRASP son un método multiarranque, adaptativo y aleatorizado. Son adaptativos, porque en cada iteración de la fase de construcción, se actualizan los beneficios asociados a cada elemento; y son aleatorizados, porque con los mejores elementos a añadir, se construye una lista y se elige de forma aleatoria uno de los candidatos de esa lista.

De esta forma, la solución que se generan con la fase de construcción no tiene por qué ser un óptimo local, por lo que se aplica un procedimiento de búsqueda local, para mejorar la

solución. La búsqueda local finaliza cuando no se encuentra una solución que mejore a la actual en el vecindario.

### **2.1.3.5 Temple o recocido simulado**

El temple o recocido simulado es una de las metaheurísticas más antiguas. Fue introducido, en el año 1983, por Kirkpatrick, et al (1983), para la optimización combinatoria. Debe su nombre a las similitudes que presenta con el proceso físico conocido como temple, en el que un material es calentado hasta el estado líquido y luego, es enfriado lentamente para obtener un refinamiento del mismo. La principal característica del temple simulado es su capacidad para poder escapar de óptimos locales (Caballero; et al, 2007). Esto hace que este método se haya aplicado en una multitud de aplicaciones prácticas, en diferentes ámbitos de la ingeniería y de las ciencias.

En el trabajo de Vidal (1993) podemos encontrar aplicaciones al Problema del Viajante (*Travelling Salesman Problem*, TSP, por sus siglas en inglés), al problema de Rutas de Vehículos o al diseño de redes de telecomunicaciones. Fue utilizado por primera vez en programación multiobjetivo por Serafini (1992).

Se suele decir que aunque es muy fácil hacer que temple simulado funcione, es difícil conseguir que funcione bien. Dowsland y Adenso (2001) indican que esto es debido a que no es propiamente un algoritmo, sino un método heurístico que necesita de varias decisiones, para que quede totalmente diseñado. Estas decisiones se pueden clasificar en genéricas o específicas. Las decisiones genéricas tienen que ver, básicamente, con los parámetros relacionados con el enfriamiento: valores máximos y mínimos de la temperatura, la velocidad de reducción y las condiciones de parada. Podemos encontrar una información más detallada en Aarts; et al (1989), en Aarts; et al (1997) y en Hajek (1988).

Las decisiones específicas tienen que ver con el espacio de soluciones, la solución inicial, la estructura del entorno y la función objetivo. La inter-actuación de estas variables influye de modo considerable en la solución inicial, tal como lo indica Hajek (1988).

En su definición clásica, en cada iteración genera, de forma aleatoria, una solución vecina a la actual ( $X' \in N(X^a)$ ) y la acepta como la nueva solución actual, según la distribución de probabilidad Boltzmann (se supone que se pretende minimizar  $f$ ):

$$P(X^a \rightarrow X') = \exp - \frac{f(X') - f(X^a)}{T}$$

donde  $T$  es la temperatura actual del sistema, parámetro que decrece a lo largo del proceso de búsqueda. Según esta distribución de probabilidad, al principio, la probabilidad de aceptar movimientos a peores soluciones es alta y gradualmente decrece, llegando a comportarse como una técnica de búsqueda local.

#### **2.1.3.6 Colonias de hormigas**

Las hormigas son insectos sociales que viven en colonias y que, gracias a su interacción colaboradora, son capaces de mostrar comportamientos complejos y de resolver tareas difíciles desde el punto de vista local de una sola hormiga. Un aspecto muy interesante del comportamiento de varias especies de hormigas es su habilidad para encontrar los caminos más cortos entre el hormiguero y las fuentes de comida. Mientras caminan, las hormigas depositan una sustancia química olorosa, denominada feromona. Si no hay presencia de rastros de feromona, las hormigas se mueven de forma aleatoria. Sin embargo, en presencia de rastros de feromona, presentan una tendencia a seguirlos. Cuando existe más de un rastro, las hormigas realizan una elección probabilística, condicionada por la cantidad de feromona que presenta cada rastro: los rastros con más feromona son más deseables. Debido a que las hormigas, que regresan al hormiguero, vuelven a depositar feromona en el camino que realizaron, se realiza un proceso de auto-refuerzo. Dicho proceso da lugar a la formación de caminos con alta concentración de feromona. Este comportamiento permite a las hormigas identificar el camino más corto entre el hormiguero y la fuente de comida. Este procedimiento se complementa con el hecho de que la feromona se evapora tras cierto tiempo. De esta forma, los caminos menos prometedores pierden progresivamente su feromona porque cada vez los utilizan menos hormigas (García Martínez, 2008, 17-18).

Los algoritmos basados en colonias de hormigas se fundamentan en una colonia de agentes, hormigas artificiales, que trabajan cooperativamente y se comunican a través de rastros de feromona artificial (Dorigo; et al, 1996). En cada iteración, cada hormiga realiza un recorrido por el grafo asociado al problema, que se traduce en una solución. Cada arco del grafo representa las opciones que puede tomar una hormiga; los cuales tienen asociados dos tipos de información, que guían la elección de la hormiga (García Martínez, 2008, 17-18):

- Información heurística: mide la preferencia heurística de trasladarse desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ . Se denota  $\eta_{ij}$ . Depende del problema tratado y no se modifica a lo largo de la ejecución del algoritmo.
- Información del rastro de feromona: mide la preferencia aprendida de realizar ese movimiento e imita la feromona natural que depositan las hormigas reales. Esta información se modifica a lo largo de la ejecución según las soluciones producidas por las hormigas. Mejores soluciones recibirán mayor cantidad de feromona. Esta información se denota por  $\tau_{ij}$ .

El primer algoritmo, basado en la optimización, mediante colonias de hormigas fue aplicado al TSP (Dorigo; et al, 1996). A partir de este algoritmo se desarrollaron heurísticos que incluyen mejoras y han sido aplicados a problemas de rutas. Este método también se ha aplicado con éxito a la programación multiobjetivo, como puede verse en Gravel, et al (2002) y en Guntch y Middendorf (2003).

### **2.1.3.7 Búsqueda dispersa**

La búsqueda dispersa (*scattered search*) es un metaheurístico, que fue introducido en los años setenta, en un trabajo de Glover (1977), para la programación entera, que no fue ni aplicado ni debatido hasta 1990. Un procedimiento de búsqueda dispersa, fundamentalmente se basa en combinaciones de soluciones de un conjunto de referencia, para construir, a partir de ellas, nuevas soluciones, que mejoran los elementos del conjunto. Se podría pensar que se trata de un algoritmo evolutivo, aunque no lo es. La diferencia

radica en que la combinación de soluciones se hace de forma sistemática, sin componentes aleatorios y sobre un conjunto pequeño de soluciones de referencia; mientras que en el algoritmo evolutivo se combina un gran número de soluciones.

Se debe destacar que los elementos que forman parte del conjunto inicial, deben ser puntos dispersos de alta calidad, de este conjunto inicial. Después se forman subconjuntos que se combinan entre sí, para dar lugar a nuevas soluciones. Al final, se suele realizar un método de mejora local, bien por búsqueda local o por búsqueda tabú.

En Glover (1998) se recopilan y organizan ideas fundamentales de la búsqueda dispersa, procedentes de trabajos anteriores, dando lugar a una versión estándar del método mediante un esquema o plantilla. A su vez, este procedimiento se ha aplicado con éxito a problemas complejos de programación matemática, como se puede ver en Laguna y Martí (2003). Se pueden citar también los trabajos de Beausoleil (2006) y de Molina, et al (2007).

#### **2.1.3.8 Algoritmo basado en nubes de partículas**

El algoritmo basado en nubes de partículas (*particle swarm optimization*), fue desarrollado por Kennedy y Eberhart (2001) y está basado en el comportamiento de vuelo de las bandadas de pájaros y de los bancos de peces. Dicha técnica, así como la colonia de hormigas, son métodos en los que un grupo de agentes, trabajan cooperativamente y realizan procesos de comunicación. Inicialmente, cada agente se sitúa aleatoriamente en un punto del espacio de búsqueda (una solución), con una velocidad aleatoria. En cada iteración, cada agente se desplaza de un punto del espacio de búsqueda a otro, según una velocidad que describe su movimiento. Esta velocidad se modifica en cada iteración, teniendo en cuenta la información local y global, de todo el grupo de agentes (García Martínez, 2008, 19).

Como herramienta de optimización, genera un algoritmo basado en la población en la que los individuos, a los que se denominan partículas, pueden cambiar su posición a lo largo del tiempo. Cada partícula se mueve en un espacio de búsqueda multidimensional. Durante el vuelo, cada partícula puede modificar su posición, de acuerdo a su propia experiencia. Es

decir, teniendo en cuenta los estados anteriores, por los que ha pasado, haciendo uso de su memoria y también considerando las posiciones de las partículas más cercanas a ella. En definitiva, trata de buscar la mejor posición encontrada por ella y por sus vecinos. De esta forma hace uso de su memoria y de la memoria vecinal (Martínez, 2013, 50-51).

Es un sistema multiagente, en el que las partículas se mueven por el espacio buscando y guardando la mejor posición que han encontrado. Su movimiento se guía por el de las partículas óptimas en el momento actual. Este procedimiento ha sido adaptado a problemas multiobjetivo por Santana (2006), quien ha desarrollado un híbrido de búsqueda dispersa con nubes de partículas (Martínez, 2013, 51).

### **2.1.3.9 Algoritmos meméticos**

Los algoritmos meméticos son una familia de metaheurísticas basadas en población. Esto quiere decir que mantienen un conjunto de soluciones candidatas para el problema considerado. Tratan de aunar ideas y conceptos procedentes de distintas técnicas de resolución, como son la búsqueda por entornos y los algoritmos evolutivos. El término “memético” procede de la palabra inglesa meme, que designa el análogo del gen en el contexto de la evolución cultural. El empleo de esta terminología no supone un propósito de unirse a estrategias de evolución cultural, sino de difuminar lo meramente biológico y optar por modelos en los que se aprende y se transmite la información. Se puede decir que un algoritmo memético es una estrategia de búsqueda, en la que una población de agentes optimizadores compiten y cooperan de manera sinérgica (Moscato; et al, 1989). Además, estos agentes hacen uso explícito del conocimiento del problema que tratan de resolver (Martínez, 2013, 42).

A diferencia de otros métodos de optimización, los algoritmos meméticos fueron concebidos explícitamente como un paradigma ecléctico y pragmático, abierto a la integración de otras técnicas (metaheurísticas o no), como indica Cotta (2007). Se deben entender a los algoritmos meméticos como algoritmos integradores; ya que reúnen, en un solo procedimiento de búsqueda, diferentes heurísticas (Martínez, 2013, 42).

Una de las características más distintivas de los algoritmos genéticos es el empleo de estrategias de búsqueda local. Éstas constituyen una de las razones esenciales por las que es apropiado usar el término “agente”, en este contexto, debido a que su funcionamiento es local y en ocasiones incluso autónomo. De esta manera, un algoritmo genético puede verse como una colección de agentes, que realizan una exploración autónoma del espacio de búsqueda, cooperando en ocasiones a través de la recombinación, y compitiendo por recursos computacionales a través de los mecanismos de selección/reemplazo (Cotta, 2007, 142).



**CAPITULO 3:**  
**OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO**



### 3.1 Metaheurísticos para problemas multiobjetivo

La mayoría de los problemas de optimización del mundo real son de naturaleza multiobjetivo. Esto supone que hay que minimizar o maximizar varias funciones, a la vez, que están normalmente en conflicto entre sí. Debido a la falta de soluciones metodológicas adecuadas, los Problemas de Optimización Multiobjetivo (*Multiobjective Optimization Problems*, MOP, por sus siglas en inglés) se han resuelto en el pasado, como problemas mono-objetivo. Sin embargo, existen diferencias fundamentales en los principios de funcionamiento de los algoritmos para optimización mono y multiobjetivo. Así, las técnicas utilizadas para resolver los MOP, no se restringen normalmente a encontrar una solución única. Es decir, buscan un conjunto de soluciones de compromiso, entre los múltiples objetivos contrapuestos; ya que no suele existir una solución que optimice simultáneamente todos los objetivos. Se pueden distinguir, por tanto, dos etapas, cuando se aborda este tipo de problemas. Por un lado, la optimización de varias funciones objetivo involucradas; y, por otro lado, el proceso de la toma de decisiones, sobre qué solución de compromiso es la más adecuada. Atendiendo a cómo manejan estas dos etapas, las técnicas para resolver los MOP, se pueden clasificar en: a priori (cuando las decisiones se toman antes de buscar soluciones), progresivas (cuando se integran la búsqueda de soluciones y la toma de decisiones) ya posteriori (cuando se busca antes de tomar decisiones) (Luna, 2008, 28).

Así mismo, se entiende por MOP, a aquellos que tienen la siguiente forma:

$$\text{minimizar } [f_1(s), f_2(s), \dots, f_k(s)]$$

sujeto a:

$$s \in S$$

donde  $k$  es el número de funciones objetivo.

Un MOP, se puede definir como el problema de encontrar un vector de variables de decisión, que satisface un conjunto de restricciones y que optimiza un conjunto de funciones objetivo. Cuando se aborda la resolución de un problema de optimización multiobjetivo, la principal meta de todo algoritmo de optimización es encontrar su conjunto óptimo de Pareto. Se busca idealmente un número de soluciones no dominadas, que

persiguen dos metas. La primera es encontrar un conjunto de soluciones, lo más cercano posible al frente de Pareto óptimo. Y la segunda es encontrar un conjunto de soluciones tan uniformemente diverso, como sea posible.

Existe una gran cantidad de metaheurísticos para el tratamiento y para la resolución de los MOP, los cuales se pueden clasificar en aquellos basados en búsquedas por entornos (diseñados para búsquedas locales) y los que se basan en poblaciones (también conocidos como algoritmos evolutivos).

Existen distintas clasificaciones sobre los algoritmos para la resolución de problemas multiobjetivo. Marler and Arora (2004) y Josefowicz (2008) engloban todos los métodos, ya sean exactos o metaheurísticos. Otros autores como Jones (2002) y Molina (2012) se centran en el análisis de metaheurísticas, ya que consideran que la búsqueda del conjunto de Pareto es más eficiente en el ámbito práctico.

### **3.1.1 Métodos basados en poblaciones**

También llamados algoritmos evolutivos, los cuales utilizan mecanismos de selección natural, como motor de búsqueda para resolver problemas. Una de sus principales ventajas, por la que son tan utilizados en la actualidad, es que son capaces de evolucionar a todo un conjunto de posibles soluciones (población), que permitirán encontrar varios miembros del conjunto de Pareto, en una iteración simple del algoritmo, en lugar de tener que hacer varias ejecuciones. A su vez, son menos sensibles a las características de la frontera de Pareto como la concavidad y convexidad, entre otras (Crespo; et al, 2007, 123).

Se le considera un proceso estocástico e iterativo, que opera sobre un conjunto  $P$  de individuos, donde cada uno de estos individuos contiene una serie de cromosomas, que le permiten representar una solución. Cada uno de ellos es evaluado a través de una función de adecuación, de forma que se predispone la selección de aquellos individuos, con mejor valor de adecuación para su reproducción (Crespo; et al, 2007, 123).

Los algoritmos evolutivos se clasifican en tres grandes grupos: la programación evolutiva, las estrategias de evolución y los algoritmos genéticos.

Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos, que pueden utilizarse para resolver problemas de búsqueda y de optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. Por imitación de este proceso, son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones, hacia valores óptimos del problema, depende, en buena medida, de una adecuada codificación de las mismas. Los principios básicos de los algoritmos genéticos fueron establecidos por Holland (1975); y se encuentran bien descritos en los textos de Goldberg (1989), Davis (1991), Michalewicz (1992) y Reeves (1993). A su vez, utilizan una analogía directa con el comportamiento natural. Trabajan con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución factible, a un problema dado.

Cabe destacar que el poder de los algoritmos genéticos proviene del hecho de que se trata de una técnica robusta. Dichos algoritmos pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas, provenientes de diferentes áreas, incluyendo aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades. Si bien no se garantiza que el algoritmo genético encuentre la solución óptima del problema, existe evidencia empírica, de que se encuentran soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo, con el resto de los algoritmos de optimización combinatoria. En el caso de que existan técnicas especializadas para resolver un determinado problema, lo más probable es que superen al algoritmo genético, tanto en rapidez como en eficacia. El campo de aplicación de los algoritmos genéticos se relaciona con aquellos problemas, para los cuales no existen técnicas especializadas.

### **3.1.2 Métodos escalares**

De forma general, se pueden definir como aquellos algoritmos que utilizan algún procedimiento de transformación matemática para convertir un problema multiobjetivo en uno mono-objetivo. El procedimiento más popular es el de agregación por sumas ponderadas, en el cual, se evalúa la importancia relativa de cada uno de los objetivos

considerados. Aunque esta técnica parece muy sencilla de aplicar, presenta varios inconvenientes como son la dificultad de agregar algunos objetivos conflictivos y también el hecho de que para encontrar soluciones eficientes la función tiene que ser convexa. No obstante, las funciones de agregación no lineales no necesariamente presentan esta limitación. No obstante, la comunidad de metaheurísticos tiende a prestar cada vez menos interés en las funciones de agregación.

Otro procedimiento es la programación por metas, en la cual de forma sencilla pueden definirse cómo establecer metas para alguno de los objetivos, de manera que se desea minimizar la diferencia existente entre la solución actual y dicha meta, aunque puede resultar muy complicado establecer las metas. Estas metas pueden estar predefinidas, establecerse de manera dinámica o estar determinadas por otros indicadores durante el proceso de optimización. Una tercera opción es el método conocido como ‘ $\epsilon$ -restricción’, donde se tiene en cuenta solamente una función objetivo y el resto de los objetivos son considerados como restricciones tales que  $f_i(x) \leq \epsilon_i$ . Al utilizar distintos valores de  $\epsilon_i$  se obtienen distintas soluciones y se pueden analizar distintos escenarios. Las desventajas de este método son que las restricciones pueden dar lugar a analizar conjuntos vacíos, soluciones no óptimas o guiar el proceso hacia la misma solución.

En la literatura, se puede mencionar a Josefowicz et al. (2008) que presenta un análisis mayor de estos métodos con distintos problemas de aplicación, analiza situaciones en las que éstos resultan prácticos y muestra cómo enfrentarse a algunos de sus puntos débiles.

Por otro lado, es sencillo comprender las ventajas que presentan estos métodos, ya que permiten hacer uso de técnicas y herramientas de optimización mono-objetivo. En contrapartida, saltan a la vista los inconvenientes de los mismos, y es que como indica Molina (2012), las consideraciones intuitivas suelen ser falsas, ya que desde un primer momento podemos estar buscando un espacio de soluciones que no es realmente óptimo para el problema analizado.

### 3.2 Enfoques para solucionar problemas multiobjetivo

Existen diversos enfoques para solucionar problemas multiobjetivo, entre los que se encuentran:

- A priori: El decisor aporta una información y se espera a ver el conjunto eficiente obtenido para terminar estableciendo sus preferencias en una segunda fase. Establece desde el inicio del proceso de solución una guía de análisis para el mismo.
- A posteriori: Se genera una amplia gama de soluciones no dominadas, buscando de esta forma generar una mayor cantidad de escenarios para la toma de decisiones.
- Interactivo: Las preferencias, valoraciones y opiniones del decisor son incorporadas durante el proceso.

Por otra parte, existen diversas estrategias para representar las preferencias de los tomadores de decisiones involucrados en cada caso, las cuales se exponen a continuación:

- Lexicográficas: Los objetivos son organizados según un orden de importancia preestablecido. El problema se resuelve procediendo a optimizar cada uno de los objetivos según este orden.
- Funciones de agregación: Se trata de convertir el problema multiobjetivo en uno mono-objetivo. El procedimiento más sencillo es el uso de combinaciones de los objetivos, habitualmente mediante combinaciones lineales, aunque pueden ser también no lineales. Estas técnicas son conocidas como funciones de agregación ya que combinan todos los objetivos en uno solo.
- Programación por Metas: Se incorpora información al proceso mediante el establecimiento de los denominados niveles de aspiración para los diferentes objetivos.

- Programación Física: Es similar a la programación por metas. Aquí, las metas son establecidas por factores físicos propios del problema objeto de estudio.
- Programación Compromiso: Se buscan soluciones tratando de encontrar un punto de equilibrio entre los objetivos planteados.

El común denominador de todas estas estrategias es la necesidad de encontrar un conjunto de puntos eficientes lo suficientemente amplio y representativo como para poder encontrar en él una alternativa que se ajuste a las preferencias del decisor.

**CAPITULO 4:**  
**PROBLEMAS DE TRANSPORTE URBANO:**  
**MODELOS Y MÉTODOS DE SOLUCIÓN**



## **4.1 Métodos aplicados al transporte urbano**

El crecimiento continuo de la demanda de viajes, en el transporte urbano, es una de las más importantes cuestiones, que deben hacer frente los tomadores de decisiones. El notable aumento del tráfico urbano, el consumo de energía y la presencia de externalidades, tales como la contaminación atmosférica, el ruido, las emisiones de los gases de efecto invernadero, los accidentes, los efectos barreras, los impactos sobre el medio natural y la congestión, que se han producido por el aumento del tráfico de automóviles individuales. Algunas de las soluciones existentes, a estos problemas, son la construcción y la expansión de las carreteras, el peaje y la introducción de las políticas de gestión de la demanda de transporte, dirigidas al cambio en la distribución modal, hacia el transporte público, entre otras. Este tipo de transporte hace un mejor uso de las fuentes de la tierra, del aire y de la energía, que el modo de transporte individual.

El problema de diseño de la red de autobuses, en un contexto de tránsito multimodal, consiste en determinar la óptima (o casi óptima) configuración de la red, en términos de rutas de autobuses y de la frecuencia del servicio, con el fin de minimizar una función objetivo. Dicha función representa los costes totales involucrados en el sistema de transporte. La planificación de un sistema de transporte público se compone de tres grandes tareas: selección de tecnologías, estimación de la demanda y selección del mejor sistema. La primera consiste en que cada tecnología realiza el acto de transportar pasajeros de un punto a otro de una ciudad de formas diferentes, siendo las más comúnmente usadas el autobús, el autobús articulado y el metro. La elección de la más adecuada o, en su caso, de una combinación de varias, debe tener en cuenta diversos factores como la velocidad de operación, la capacidad, la compatibilidad con tecnologías en uso, el impacto ambiental, y las restricciones geográficas y económicas. En la estimación de la demanda, es necesario conocer las necesidades de transporte de pasajeros entre distintos puntos de la ciudad, mientras que la selección del mejor sistema, implica la planeación funcional del sistema e incluye tareas como la definición de los trazados de los recorridos, su modo de operación, la determinación de la política de despacho de los servicios y la ubicación de las estaciones de transbordo y de estacionamiento (Mauttone, 2005, 10).

La selección del mejor sistema de transporte conlleva un proceso de toma de decisiones, que involucra cinco etapas. La primera es la determinación de los trazados de los recorridos. Esto implica definir la estructura topológica de cada recorrido, como una secuencia de calles. La segunda es la determinación de las frecuencias, que implica definir el intervalo de tiempo entre salidas de un autobús, efectuando un recorrido particular. La tercera se refiere a la determinación de las tablas de horarios. Es decir, establecer detalladamente los horarios de salida y de llegada de los autobuses, efectuando un determinado recorrido. La penúltima es la asignación de los autobuses a recorridos, que consiste en asignar la flota de autobuses disponibles, a la realización de los diferentes servicios. Finalmente está la asignación de los conductores, que implica la atribución del personal a la operación de los diferentes servicios. Al problema del diseño óptimo de recorridos y de frecuencias para el transporte público se le denomina Problema de Diseño de la Red de Tránsito (*Transit Network Design Problem*, TNDP, por sus siglas en inglés). Su solución implica hallar un conjunto de recorridos de transporte público, urbano y colectivo, con frecuencias asociadas; en base a la información geográfica y de demanda, de forma que se optimicen los objetivos de los usuarios y de los operadores, bajo determinadas restricciones, que generalmente son la satisfacción de la demanda, los niveles de servicio y la disponibilidad de los recursos (Mauttone, 2005, 10-11, 17).

El TNDP, es un problema complejo y no convexo (Newell, 1979; y Baaj; et al, 1991). Es generalmente formulado como un problema de optimización no lineal, con las dos variables y restricciones discretas y continuas. Los mejores y más eficientes métodos de solución se basan en procedimientos heurísticos, pero sus aplicaciones están limitadas a casos de prueba o a redes reales de pequeño tamaño. Varios autores han propuesto un informe sobre el diseño de rutas, la frecuencia de configuración, la programación de horarios de las líneas de tránsito y su combinación. Entre ellos se encuentran Desaulniers y Hickman (2007), Guihaire y Hao (2008) y Kepaptsoglou y Karlaftis (2009). Entre las obras más notables en esta materia, hay que destacar la de Ceder e Israeli (1993), Baaj y Mahmassani (1995), Carrese y Gori (2002) y Lee y Vuchic (2005). Ceder e Israeli (1993) propusieron un procedimiento de diseño de la red de tránsito, basado en un enfoque de programación matemática, cuyo primer paso genera un gran conjunto de rutas factibles, conectando cada

nodo con el resto de los demás. Entonces, el sistema crea los mínimos sub-conjuntos de rutas, que resuelve un problema en conjunto, que abarca y selecciona el más adecuado, mediante la aplicación de un análisis multiobjetivo. Baaj y Mahmassani (1995) utilizaron un algoritmo heurístico artificial e inteligente, para la generación de la ruta. Dicho algoritmo consistió en la selección de un número dado de pares de nodos de alta demanda, para construir un esqueleto inicial de la red, mediante la conexión de estos pares de nodos, a través de los caminos más cortos. El esqueleto se expande progresivamente a las rutas de acuerdo, a una estrategia de selección de nodo, que refleja las diferentes soluciones, entre las medidas de rendimiento y de los costes de operación y de los usuarios. Carrese y Gori (2002) propusieron un modelo de diseño de la red de autobuses, para el desarrollo de un sistema de tránsito jerárquico. El procedimiento de diseño se divide en dos fases. En la primera fase, se identifica el esqueleto de la red de autobuses, como resultado de un proceso de concentración de flujo. En la segunda fase, se definen los niveles integrados de la red de autobuses, así como las líneas articuladas principales y secundarias. Lee y Vuchic (2005) propusieron un procedimiento que, a partir de un conjunto inicial de rutas, compuestas por el camino más corto de los pares origen-destino, trata de mejorarlo, mediante la realineación de las rutas y eliminando las menos eficientes, teniendo en cuenta, de manera explícita, el cambio de distribución modal (Cipriani; et al, 2012, 4).

Muchos enfoques adoptados en la literatura, ignoran la naturaleza multiobjetivo del problema. Sólo tres contribuciones se enfrentan a dicha naturaleza, realizando un análisis con base al óptimo de Pareto. Este enfoque se limita a dos situaciones. La primera se refiere a los casos en los que un procedimiento de optimización, que utiliza pesos, se ha ejecutado previamente (Ceder y de Israel, 1993). Baaj y Mahmassani (1991) y Mauttone y Urquhart (2009) contemplan la segunda, en la que un número limitado de soluciones, derivadas de la evaluación de un algoritmo de generación de ruta anterior (Cipriani; et al, 2012, 4).

En los últimos años, la evolución de la investigación operativa y la tecnología computacional ha dado lugar a mayor atención al TNDP. Los nuevos enfoques, basados en técnicas metaheurísticas, como los algoritmos genéticos, el recocido simulado o la búsqueda tabú se han aplicado con frecuencia, para resolver problemas de optimización.

Debido a la discreta naturaleza de varias variables del TNDP, así como la no linealidad y la no convexidad de su función objetivo, las técnicas de optimización probabilísticas, como los algoritmos genéticos, parece ser adecuado. Xiong y Schneider (1993) mostraron que los algoritmos genéticos resuelven eficazmente el TNDP. Chakroborty (2003) destacó que, en la optimización basada en algoritmos genéticos, es posible incluir la información específica del problema y obtener soluciones óptimas o casi óptimas, con poco esfuerzo computacional. Pattnaik, et al (1998) implementó un procedimiento de dos etapas para el diseño de la red de tránsito. En primer lugar, se genera un conjunto de rutas posibles; después, el algoritmo genético diseñado selecciona la óptima (o casi óptima) red de rutas, mientras que los diferentes esquemas de codificación pueden ser aplicados, para representar el número de rutas de la red, mediante el uso de longitud de la cadena fija o variable (Cipriani; et al, 2012, 4).

Una solución al TNDP es una dupla  $S = (R, F)$ , donde:  $R$  es un conjunto de recorridos,  $R = \{r_1, \dots, r_r\} \subseteq \Omega$ , donde  $\Omega$  es el conjunto de todos los recorridos posibles.  $F$  es un conjunto de frecuencias de operación de los recorridos,  $F = \{f_1, \dots, f_r\} \in^{+r}$ , expresadas en pasadas (salidas de un autobús, iniciando el recorrido) por unidad de tiempo.  $f_k$  es la frecuencia correspondiente al recorrido  $r_k$ , para todo  $k \in [1, r]$ . Ocasionalmente se denomina línea  $l_k$ , al par  $(r_k, f_k)$ . Un recorrido  $r_k \in R$  consiste en una secuencia de nodos, pertenecientes a un determinado modelo de red, de la zona urbana de estudio, cuya definición está estrechamente relacionada con la caracterización disponible, para la demanda de viajes (Mauttone, 2005, 17).

La demanda de viajes se caracteriza mediante una matriz origen-destino  $D = \{d_{ij}\}$ . Donde cada entrada  $d_{ij}$  indica la demanda (necesidades y deseos) de los viajes desde la zona  $i$  hacia la zona  $j$ , expresada en viajes por unidad de tiempo, que serán realizados por un pasajero, que ocupará un lugar en un autobús, en un determinado período. Existen distintas formas de relacionar los elementos de dicha matriz origen-destino, con los elementos de la red. Si esta última, modela en forma detallada la realidad, deben distribuirse los valores  $d_{ij}$  entre las paradas correspondientes a las zonas  $i$  y  $j$ . Si el modelo de red solamente consta de

centroides de zonas y conexiones entre los mismos, los valores de demanda se corresponden directamente con pares de nodos de la red. Ortúzar y Willumnsen (1996) llevaron a cabo una introducción al modelado de escenarios urbanos, en particular la zonificación y la construcción de la red, para estudios de transporte de propósito general (Mauttone, 2005, 19-20).

El TNDP es un problema de optimización de variables mixtas. Por un lado, debe determinarse la estructura de cada recorrido  $r \in R$ , como una secuencia de nodos de la red  $G$ ; y por otro lado, deben determinarse los valores de las frecuencias  $f \in F$ , que pertenecen a un dominio real. Puede formularse como:

$$\min f(R, F)$$

*sujeto a:*

$$R \in C_R$$

$$F \in C_F$$

donde  $R$  es un conjunto de recorridos, que debe respetar un conjunto de restricciones, que determinan el conjunto  $C_R$ .  $F$  es un conjunto de valores de frecuencias, que debe respetar un conjunto de restricciones, que determinan el conjunto  $C_F$ . Mientras que  $f$  es una función que representa los objetivos de los usuarios y de los operadores (Mauttone, 2005, 21).

Así mismo, en el caso del TNDP se busca minimizar simultáneamente las funciones objetivo de los usuarios y de los operadores,  $f_U$  y  $f_O$  respectivamente. En el contexto de la optimización multiobjetivo, el modelo del TNDP se expresa como:

$$\min f_U(S)$$

$$\min f_O(S)$$

*sujeto a:*

$$S \in C$$

La consideración de los objetivos de los usuarios implica la minimización de los tiempos de viaje y de espera. Para calcular estos valores, en base a una solución dada  $S = (R, F)$ , es necesario conocer, para cada par de nodos  $(i, j)$  de la red, el conjunto de recorridos de  $R$  que pueden ser utilizados para transportar la demanda  $d_{ij}$ . Dado que pueden existir varias opciones (que incluso pueden involucrar transbordos), es necesario contar con un criterio para distribuir la demanda entre los distintos recorridos. Por otra parte, para estimar los tiempos de espera, es necesario conocer las frecuencias de estos recorridos. El objetivo de los operadores es la continuidad y la maximización de sus beneficios, los cuales dependen principalmente de la recaudación y de los costes operacionales. En este caso, la cantidad de pasajeros y la tarifa que se paga, determinan la recaudación de los operadores; mientras que la forma más empleada de representar los costes de los operadores es mediante el tamaño de la flota de autobuses, necesaria para cubrir los servicios (Mauttone, 2005, 26-28).

Este modelo no tiene una única solución, sino varias. Dichas soluciones, representan diferentes compromisos entre los diferentes objetivos en conflicto. Estas soluciones se denominan no dominadas, y el conjunto de todas las soluciones no dominadas se denomina frente de Pareto. Cabe señalar que la resolución de un modelo de optimización multiobjetivo implica hallar un frente de Pareto, compuesto de varias soluciones no dominadas. El área de investigación, dedicada a la resolución del problema, de seleccionar una solución de compromiso, entre los diferentes objetivos en conflicto, en base a los criterios del responsable de la toma de decisiones se denomina toma de decisiones multicriterio (Mauttone, 2005, 25-26).

#### **4.2 Problemas existentes en el campo del transporte urbano**

La eficiencia del transporte es un requisito indispensable para garantizar la movilidad a mediano y a largo plazos; especialmente en las principales ciudades de México. Las condiciones de los desplazamientos urbanos se deterioran gradual y considerablemente; la velocidad promedio, en las horas pico, es muy baja, por el congestionamiento de los vehículos; y la infraestructura vial es cada vez más precaria, presentándose una expansión acelerada del parque automotor, tanto público como privado. La Ciudad de México cuenta

con 29 millones de habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010). Brindarle movilidad a cada uno de ellos, implica tener un servicio de transporte público de enormes magnitudes. Los servicios de transporte actuales constan de diferentes medios que, si bien permiten la movilidad de la mayor parte de la población, no operan con eficiencia ni calidad. Esto genera un sin número de problemas (contaminación, tráfico, estrés y pérdida de horas habitante, entre otros) que reducen la calidad de vida de la población.

Desde un punto de vista económico, hay dos causas que provocan lo anterior. La primera se refiere a los incentivos perversos, generados por las concesiones individuales otorgadas a los microbuses y los altos costes asociados, que obstaculizan una multimodalidad eficiente. Por otra parte, está el punto de vista institucional, el cual se refiere a la falta de mecanismos de coordinación entre las diferentes instancias de gobierno, que contribuye a la baja calidad de los servicios.

La segunda se refiere a que la integración de cada uno de los modos de transporte público, para generar una red multimodal es muy baja. No existe un sistema de pago integrado, que facilite a los usuarios pre-pagar sus pasajes y abordar con facilidad a cada medio de transporte. Los sistemas de prepago del Metro, del Tren Ligero, del Tren Suburbano y del Metrobús no son compatibles, lo que incrementa los costes de transacción.

A continuación se exponen algunos de los problemas más frecuentes en el transporte urbano y en sus rutas.

#### **4.2.1 Problemas de las rutas**

Los problemas de rutas son una de las partes más importantes de la logística del transporte. Esto sucede porque se busca la optimización (normalmente reducción de costes, vehículos o ambas cosas) de un conjunto de rutas a realizar, por una flota de vehículos, que usualmente está en un punto geográfico común o depósito y que, conjuntamente, deben satisfacer las demandas (recogida/entrega o ambas cosas) de mercancías, de unos clientes geográficamente dispersos (Campos, 2004, 1).

En este sentido, los problemas de rutas se pueden clasificar atendiendo al lugar en donde se produce la demanda, distinguiendo entre los problemas por vértices y los problemas por arcos. En los primeros, el elemento esencial a visitar, por los vehículos, son los clientes situados en los nodos o vértices de un grafo. Tal es el caso del problema de obtener un ciclo, que pase por todos los vértices de un grafo, de forma que el recorrido/distancia total sea el mínimo posible. Esto constituye al TSP, en el que un único vehículo debe realizar todo el trabajo. Para cincuenta vértices, el número de ciclos posibles es del orden de  $10^{64}$ . Hallar, por enumeración, el mejor ciclo posible, supondría emplear años de computación, con las computadoras actuales. El Problema de Ruteo de Vehículos (*Vehicle Routing Problem*, VRP, por siglas en inglés) es una generalización natural del TSP, en donde la demanda total requiere más de un vehículo (Campos, 2004, 1).

En los problemas por arcos, los vehículos deben recorrer todos o parte de los enlaces de un grafo. El problema equivalente al TSP es el Problema del Cartero Chino (*Chinese Postman Problem*, CPP, por sus siglas en inglés), en el que un cartero debe completar un circuito, recorriendo todas las calles de una parte de la ciudad (que se supone induce un grafo conexo), repartiendo el correo y minimizando la distancia total. A diferencia del TSP, el CPP es un problema técnicamente resuelto. Es decir, se conoce un algoritmo capaz de encontrar la solución óptima, en un tiempo razonable (tiempo acotado por un polinomio en el tamaño del problema). Esto permite resolver óptimamente el CPP de gran tamaño. La generalización a varios vehículos se conoce como *Capacitated Arc Routing Problem* (CARP). En este problema, los vehículos deben recorrer circuitos con aristas servidas y no servidas. Estas últimas serán servidas por otro vehículo (Campos, 2004, 1).

El Problema de Rutas de Vehículos con Capacidades (CVRP, por sus siglas en inglés) está relacionado con el TSP. Por lo tanto, se le da un conjunto finito de ciudades y la distancia de recorrido, entre los que se supone cada par de ciudades a ser conocido. En el CVRP, una ciudad específica se considera que es el depósito para una flota de vehículos, mientras que las otras ciudades son identificadas como clientes. Todos los clientes corresponden a los clientes de entrega. Es decir, un vehículo entrega una cantidad de un producto único, para cada cliente. Las demandas de entrega de los clientes son deterministas y no se asume que

dichas demandas no se puedan dividir. Es decir, han de ser entregadas por un solo vehículo. Los vehículos son idénticos y, en un principio, destinados en un único almacén central; y sólo las restricciones de capacidad se imponen en los vehículos. El objetivo es minimizar el recorrido total y el coste de los vehículos de servicio, de todos los clientes (Hernández, 2005, 12).

Los problemas de ruteo de vehículos son otro ejemplo de problemas de optimización combinatoria. El VRP se utiliza para diseñar las rutas óptimas, para una flota de vehículos, para dar servicio a un conjunto de clientes, dado un conjunto de restricciones. El VRP se utiliza en la gestión de la cadena de suministro y en la entrega física de los bienes y servicios. Éstos se formulan sobre la base de la naturaleza de los bienes transportados, la calidad del servicio requerido y sobre las características de los clientes y de los vehículos.

El VRP ha sido estudiado muy extensamente en la literatura de optimización. Comenzó a estudiarse con los trabajos de Dantzig y Ramser (1959) y Clarke y Wright (1964). El VRP ofrece una gran variedad de enfoques heurísticos y metaheurísticos, que se encuentran en los trabajos de Laporte (1992); Gendreau, Laporte y Potvin (2002); y Cordeau, Gendreau Hertz, Laporte y Sormany (2005). El VRP tiene una especial importancia en la determinación de estrategias eficientes para la reducción de los costes de operación, en las redes de distribución. Hoy en día, los métodos de VRP exactos tienen un límite de tamaño de cincuenta a cien órdenes, en función de la variante del VRP y de los requerimientos del tiempo de respuesta. En consecuencia, la investigación actual se centra en algoritmos aproximados, que son capaces de encontrar soluciones de alta calidad, en un tiempo limitado; con el fin de ser aplicable a problemas de la vida real, que se caracterizan por grandes flotas de vehículos y que afectan las estrategias de distribución y de logística (Kumar; et al, 2012, 66).

El VRP fue descrito por primera vez por Dantzig y Ramser (1959). Éste indicaba la ruta de una flota de camiones de reparto, movidos por gasolina, entre una terminal de gráneles y un número de estaciones de servicio, proporcionados por la terminal. La distancia entre dos lugares cualquiera y la demanda de un producto determinado se especifican por las

estaciones de servicio. A su vez, puede ser definido como un problema de diseño de rutas de entrega de menor coste, desde un depósito a un conjunto de ubicaciones geográficamente dispersas (clientes), sujetos a un conjunto de restricciones (Kumar; et al, 2012, 66).

Otros problemas de ruta son los Problemas de Ruteo de Vehículos Dinámicos (DVRP, por sus siglas en inglés). Éstos se refieren en ocasiones como Problemas de Ruteo de Vehículos en Línea, que han surgido recientemente, debido a los avances en las tecnologías de información y de comunicación, que permiten que la información sea obtenida y procesada en tiempo real. En los DVRP, algunas de las órdenes se conocen con antelación, antes del inicio de la jornada laboral. Sin embargo, a medida que avanza el día, nuevos pedidos llegan y el sistema tiene que incorporarlos a un programa en evolución. Se asume la existencia de un sistema de comunicación entre el gestor (donde los recorridos son calculados, por ejemplo, la sede de la empresa) y los controladores. El despachador puede comunicarse periódicamente con los conductores sobre las nuevas visitas que se le asignen. De esta manera, durante el día, cada conductor tiene siempre el conocimiento sobre los próximos clientes asignados (Kumar; et al, 2012, 66).

Existen menos cantidad de trabajos en la literatura sobre problemas multiobjetivo, en comparación con los realizados en relación con el planteamiento y la solución de Problemas de Ruteo de Vehículos Mono-objetivo. Debido a esto, se pueden obtener puntos eficientes, que están formados por soluciones no dominadas. En dichas soluciones, no se puede preferir una solución a otra, debido a que una puede ser mejor para determinado problema y otra lo puede ser para otro problema, pero no para todos los problemas existentes.

Jozefowicz, et al (2007) mencionan que los problemas de ruteo forman una familia de problemas muy estudiada, que incluye el problema del viajero. Aunque se utilizan con frecuencia, este tipo de problemas para modelar casos reales, a menudo se establecen con el objetivo de minimizar los costes de solución, pese al hecho de que la mayoría de los problemas en la industria, especialmente en logística son problemas multiobjetivo.

Mencionan que los problemas de rutas multiobjetivo son principalmente utilizados de tres maneras: extender problemas académicos clásicos, con el fin de mejorar su aplicación práctica; generalizar problemas clásicos; y estudiar casos de la vida real, en los cuales los objetivos han sido claramente identificados por el tomador de decisiones y se aplican a un problema o aplicación de la vida real (Jozefowicz, 2007, 293-295).

Asimismo, indican que la optimización de rutas multiobjetivo es una forma posible de estudiar otros objetivos distintos al inicialmente definido, que a menudo se relaciona con el coste de la solución. De esta forma, la definición del problema permanece sin cambios y sólo se agregan nuevos objetivos. El propósito de tales anexiones es mejorar las aplicaciones prácticas del modelo, reconociendo que los problemas logísticos no sólo son determinados por los costes (Jozefowicz, 2007, 296).

Por otra parte, indica que algunos trabajos de la literatura, que hablan del problema de ruteo multiobjetivo, tienen como objetivos los siguientes: maximizar la satisfacción del consumidor, maximizar la realización de consultas urgentes, minimizar la distancia recorrida, minimizar longitudes totales, minimizar el tiempo promedio de tránsito, maximizar los beneficios y optimizar el número de clientes visitados, entre otros (Jozefowicz, 2007, 295-297).

#### **4.2.2 Problemas del transporte urbano**

El Problema del Diseño de la Red de Tránsito Urbano (UTNDP, por sus siglas en inglés) implica el desarrollo de líneas de autobús, en una red vial existente, con los tiempos de viaje de enlace asociados, de tal manera que las rutas satisfacen óptimamente algunos objetivos definidos por los tomadores de decisiones.

Las primeras herramientas de diseño de rutas y de horarios surgieron en la década de los años setenta, con base en ideas intuitivas; sin una formulación del modelo ni de la función objetivo. En la década posterior, se formularon algunas funciones objetivo, así como también parámetros relevantes de diseño, tales como la cobertura de la demanda, el factor

de carga y la transferencia en autobuses; los cuales se incorporaron al análisis. En la década de los años noventa, se desarrollaron modelos específicos, tales como el modelo de Wu, et al (1994), para el Equilibrio de Transporte Público, el Problema de Asignación y el Modelo Multiobjetivo de Israeli y Ceder (1993), entre otros.

Los métodos de optimización tradicionales tienen dificultades para resolver este problema. Se han realizado varios intentos para formular el UTNDP en términos de programación matemática. Sin embargo, ninguna de estas formulaciones de programación matemática realiza la tarea de creación de rutas. Es decir, ninguno de ellos determina las rutas. La dificultad de formular el UTNDP como un problema de programación matemática adecuada, surge del problema de ser inherentemente difícil de representar matemáticamente; sobre todo en cuanto a transferencias y continuidad. En el caso de una ruta de tránsito adecuada, los enlaces están conectados en un camino continuo; mientras que una yuxtaposición arbitraria de enlaces, no constituye necesariamente una ruta. Por otra parte, como se observa por Baaj y Mahmassani (1991), el UTNDP es un problema combinatorio discreto, con una función objetivo difícil de calcular.

Debido a las dificultades presentadas en la representación y en la solución del UTNDP a través de métodos de optimización exactos, no es sorprendente que la mayoría de los métodos existentes están basados en heurísticas, aunque con diversos niveles de sofisticación. Aparte del modelo de Hasselstrom (1981), el cual se incluye en el paquete de planificación del transporte urbano Volvo, ninguno de los otros modelos se ha aplicado efectivamente. Otra serie de artículos relacionados con el UTNDP surge en el área del problema de asignación de transporte de tránsito urbano. Una buena revisión de la literatura, relacionada con este problema, viene dada por Spiess y Florian (1989) y otro por Wu, et al (1994). Las soluciones del problema de asignación de transporte urbano consideran sólo la perspectiva de la administración; mientras, que suponiendo que el comportamiento de pasajeros refleja la reducción de transportarse a pie, los tiempos de espera en el vehículo, o alguna suma ponderada de éstos. Recientemente, Chakroborty (2003) y Fan y Machemehl (2006) se acercan a este problema, utilizando algoritmos genéticos. Además, Fan y Machemehl (2004, 2006) presentan métodos basados en

búsqueda tabú y en algoritmo de recocido simulado, respectivamente. Por último, Yang, et al (2007), presentan un método basado en la colonia de hormigas.

El UTNDP ha sido estudiado continuamente durante las últimas cinco décadas; y el número de publicaciones relacionadas con el tema ha crecido con el tiempo, probablemente porque el problema es complicado y muy actual. Varios trabajos han sido publicados, entre ellos los de Boyce (1984), Wong Magnanti (1984), Friesz (1985), Migdalas (1995), Yang y Bell (1998), Desaulniers y Hickman (2007), Guihaire y Hao (2008) y Kepaptsoglou y Karlaftis (2009). Algunos de estos trabajos hablan acerca de los problemas generales de diseño de red, pero algunos se centran específicamente en el diseño de la red urbana o en redes de transporte urbano (Farahani; et al, 2013, 281).

Dentro de los Problemas de Diseño de Redes (*Network Design Problems*, NDP, por sus siglas en inglés) se encuentran el Problema de Diseño de Red Continua (*Continuous Network Design Problem*, CNDP, por sus siglas en inglés), el Problema de Diseño de Red Discreta (*Discrete Network Design Problem*, DNDP, por sus siglas en inglés) y el Problema de Diseño de Red Mixta (*Mixed Network Design Problem*, MNDP, por sus siglas en inglés). El primero toma como dada la topología de la red y se preocupa de la parametrización de ésta (establecimiento del tiempo de señal y expansión de capacidad, entre otras); y sólo implica variables continuas de decisión. El segundo se preocupa por la topología de la red, en cuanto a la construcción y a la orientación de calles e involucra variables de diseño de decisión discretas. Dada la naturaleza combinatoria del problema, es complicado de resolver con respecto al CNDP y los métodos de solución sólo se pueden basar en algoritmos consolidados y metaheurísticos. En el caso de los algoritmos consolidados, éstos no pueden manejarse en grandes redes, por lo que deben utilizarse metaheurísticos y sus híbridos. Por su parte, el MNDP maneja la tipología de la red y la parametrización e involucra ambas variables de diseño de redes (tanto discretas como continuas) y ha recibido menor atención, en comparación con los dos primeros problemas (Miandoabchi; et al, 2013, 2429-2430).

Entre los estudios hechos con anterioridad sobre el NDP (por sus siglas en inglés), se observa que, en primer lugar, el tiempo total de viaje es una función objetivo ampliamente utilizado, pero la capacidad de reserva no lo es. La capacidad de reserva se define como el mayor multiplicador aplicado a una matriz de demanda existente, sin violar las capacidades de flujo de la calle. Dicha capacidad se ha investigado previamente por las intersecciones de la red en Webster y Cobbe (1966), Allsop (1972) y Wong (1996). La capacidad de reserva, como una función objetivo del NDP (por sus siglas en inglés), fue sugerido por primera vez por Yang y Bell (1998), pero sólo se ha adoptado en algunos trabajos del CNDP como Ziyou and Yifan (2002) y Yang y Wang (2002). En Miandoabchi y Farahani (2011) el concepto de capacidad de reserva no había sido considerado en MNDP y solo en un estudio de DNDP, mientras que para Yang y Wang (2002), el reducir al mínimo el tiempo total de viaje o el coste, no es equivalente a la maximización de la capacidad de reserva (Miandoabchi; et al, 2013, 2430).

Un ejemplo de lo anterior, se encuentra en el estudio de Duque y Robledo (2009), en el cual analizan la influencia que tienen las paradas del transporte público colectivo en las intersecciones semaforizadas del centro de Bogotá, mediante la calibración y la verificación de la validez de la fórmula del factor ajuste por obstrucción de los autobuses. En estas intersecciones se tomaron datos de las demoras de autobuses para la calibración del parámetro y del flujo de saturación, por medio del método de Webster y Cobbe (1966), entre otros.

Según Yang y Bell (1998), hay por lo menos dos ventajas de la adopción de la capacidad de reserva, como una función objetivo. En primer lugar, la aparición de la paradoja de la capacidad, la cual se puede evitar cuando la capacidad de reserva se considera en el diseño de red. En segundo lugar, permite predecir qué tanta demanda adicional se puede acomodar por la red de carreteras, después de la mejora; y por lo tanto, se pueden establecer otras políticas eficientes para la restricción del tráfico y el crecimiento de la red. En tercer lugar, la función objetivo de nivel superior tiene una forma lineal simple. Por lo tanto, el problema es mucho más fácil de resolver que los NDP con otras funciones objetivo no lineales. En cuarto lugar, la decisión óptima, en función de la capacidad de reserva, no es

sensible al nivel de la demanda. Esto es deseable cuando existe incertidumbre en la demanda de tráfico. Todos estos hechos parecen indicar que la capacidad de reserva se debe considerar en el DNDP y en el MNDP (Miandoabchi; et al, 2013, 2430).

Otra revisión de la literatura sobre los NDP es acerca de que DNDP, se enfoca principalmente en determinar las orientaciones óptimas de las calles de un sentido, la óptima combinación de los enlaces entre calles de una red de uno y dos sentidos y los anexos de líneas óptimas. A la fecha, no hay documentación que considere las asignaciones de carril en los enlaces de dos sentidos (Miandoabchi; et al, 2013, 2430).

La mayoría de los trabajos, que hablan de los NDP tienen un solo objetivo y sólo algunos tratan los NDP multiobjetivo, tales como los estudios realizados por Friesz, et al (1993), Cantarella y Vitetta (2006), Cantarella, et al (2006) y Russo y Vitetta (2006). La naturaleza de los problemas, relacionados con el transporte urbano, es multiobjetivo. Y cubre un amplio rango de criterios de evaluación para la autoridad encargada de la red y los usuarios. A su vez, algunos aumentos de capacidad en NDP se modelan mediante variables continuas. Esto no es realista y puede dar lugar a expansiones poco prácticas, como se ha señalado por algunos autores tales como Abdulaal y LeBlanc (1979) (Miandoabchi; et al, 2013, 2430).

Las expansiones de carriles son modeladas por el número de carriles agregados. Se suelen considerar las siguientes decisiones: agregar carriles a las calles existentes de la red; construir nuevas calles; alterar algunas calles de doble sentido, a calles de un solo sentido; y asignar un carril en las calles de dos vías (Miandoabchi; et al, 2013, 4).

En Odoni et al. (1994) y Bussieck et al (1997) se expone que la optimización matemática ha ido ganando considerable atención en la optimización de problemas de planificación en línea del transporte público. Los primeros modelos utilizados de manera típica se llamaban enfoques de dos fases para resolver el problema en cuestión. Durante una primera fase se construyó un conjunto de rutas y posteriormente se eligió un subconjunto de ellos y sus frecuencias fueron determinadas. En Silman et al. (1974) se propuso utilizar un modelo de

esqueleto, que comienza con la elección de los puntos finales de una ruta. Su idea principal es el montaje de rutas desde piezas cortas, después se agregan paradas intermedias, que luego se conectan mediante caminos más cortos. Este enfoque se ha extendido más en Dubois et al. (1979). Claessens et al. (1998) y Bussieck et al. (1997), mismos que proponen un método exacto para resolver la Programación Lineal Entera Mixta (MIP, por sus siglas en inglés) subyacente utilizando un enfoque basado en la técnica *branch and cut*. Sin embargo, por razones prácticas, las frecuencias deben ser elegidas al diseñar el conjunto de rutas. El no hacerlo puede resultar en el tiempo de espera innecesario y el uso ineficiente de los recursos disponibles como lo expone Schmidt (2011). Más recientemente se han propuesto varios enfoques que generan dinámicamente rutas dentro del proceso de optimización.

En Walteros et al. (2013) se presenta un algoritmo genético híbrido eficiente situaciones con uno o varios corredores. La idea principal de este enfoque es desacoplar la decisión relativa a la selección de rutas y a su evaluación de desempeño. Las rutas son diseñadas utilizando un algoritmo genético y aquellas elegidas serán evaluadas a través de la solución de un problema de optimización lineal. Los modelos de planificación de líneas se pueden diferenciar en función de sus supuestos acerca del comportamiento de pasajeros y de las rutas que poseen. En los primeros modelos propuestos por Goossens et al. (2004) y Borndörfer y Karbstein (2012), los pasajeros están pre asignados a las rutas de acuerdo a lo que se denomina sistema *split*. La asignación sin embargo, fija su camino a través de la red y se llevará a cabo antes que las rutas actuales sean diseñadas. De esta manera, se determinará la demanda en cada segmento de la red. Este enfoque facilita el manejo de las redes de transporte multimodales. Una vez que la asignación se haya hecho para los caminos, el problema se puede resolver de forma independiente para cada modo (Schmid, 2013, 4)

Un enfoque alternativo para el enrutamiento libre de pasajeros ha sido elegido en Schöbel y Scholl (2006), en el cual indican que el flujo de pasajeros está inspirado en el llamado *Change and go graph* (GNG, por sus siglas en inglés), que permite transferencias y trata de

minimizar los tiempos totales de viaje. Una visión general de los modelos y métodos para la planificación de la línea de transporte público se encuentra en Schöbel (2012).

Existen distintas maneras de corregir los problemas de planificación de línea, que también pueden clasificarse sobre la base de la topología de red subyacente. La mayoría de los trabajos en la literatura se centran en la problemática de planificación de líneas clásicas de transporte, las cuales poseen una red de nodos y bordes, rutas y frecuencias que deben definirse. En el caso del BRT es un poco diferente, ya que las rutas sólo pueden operar a lo largo de corredores específicos. Cabe destacar que no es necesario que todas las estaciones a lo largo de una línea formen parte de una determinada ruta, ya que se pueden omitir. La formulación de modelos específicos para corregir problemas en el BRT es más compleja, pero permite un transporte más eficiente de pasajeros (Schmid, 2013, 4-5).

En Torres et al. (2011) se discute un modelo de optimización teniendo en cuenta la topología antes mencionada. Sin embargo, los flujos de pasajeros no están optimizados explícitamente, pero se asume que si lo están. En la literatura se ha propuesto un enfoque exacto basado en la técnica *branch and cut and price* para resolver los problemas del BRT sin dividir el sistema de transporte, lo cual ha sido propuesto en Feuillet et al. (2010). Con este enfoque 17 casos con 19 estaciones en un solo corredor, se podían resolver de manera óptima (Schmid, 2013, 5).

Según la clasificación proporcionada en Puchinger y Raidl (2005) la técnica propuesta se puede considerar como una combinación de colaboración entre un algoritmo exacto y uno metaheurístico, que intercambia información. El concepto de descomposición y uso de metaheurísticas híbridos no es nueva. Otras aplicaciones que han tenido éxito se pueden encontrar en Parragh y Schmid (2013) y en Schmid y Doerner (2013).



**CAPITULO 5:**  
**EL SISTEMA DE AUTOBUSES DE TRÁNSITO**  
**RÁPIDO EN LA CIUDAD DE MÉXICO:**  
**VENTAJAS Y PROBLEMAS**



## **5.1 Organización funcional de la ordenación del territorio en la Ciudad de México**

El uso excesivo del transporte privado, ocasionado por la necesidad de miles de personas de recorrer grandes distancias, para llevar a cabo sus actividades cotidianas, tales como habitar, trabajar, estudiar y actividades recreativas, entre otras; ha dado lugar a grandes congestiones viales, ocasionadas por la sobrepoblación que sufre la ciudad y por la falta de vialidades que hagan circular con mayor rapidez a los millones de vehículos.

Diversos factores han provocado el crecimiento de la flota vehicular en la Ciudad de México. En primer lugar, a raíz del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), la industria automotriz en México se ha desarrollado bajo un ambiente de mayor competencia, empujando los precios de los automóviles a la baja. Las condiciones económicas favorecieron el acceso al crédito y al mercado de bienes durables. Por otro lado, la importación de autos usados e ineficientes de Estados Unidos (EEUU) es otro factor de crecimiento en la flota vehicular, equiparable en volumen a las ventas de coches autos usados.

Para reducir la demanda de transporte motorizado es necesaria una política de desarrollo y de preservación de centros urbanos, bajo criterios de sostenibilidad, que ofrezcan condiciones de habitabilidad, rescatando el paisaje urbano. La planificación urbana, de alta densidad, impone los límites de crecimiento a las zonas urbanas, que impacta directamente en el uso de los vehículos, tanto privados como públicos; y sobre todo, en el consumo de combustibles. Existen barreras institucionales que afectan la instrumentación de políticas como la descrita, como el cambio en la normatividad, para regular las relaciones económicas que dictan el comportamiento de la industria de la construcción. Esto tarda un periodo de tiempo considerado en ser diseñado y aplicado.

Existen otras opciones de movilidad, entre ellas el transporte que no es motorizado. Ésta ha dado lugar a una alternativa donde la prioridad la tiene el peatón o los ciclistas, siendo la principal ventaja el ser un transporte eficiente, accesible, no contaminante y benéfico para la salud. Mientras que debe estar conectado con los sistemas masivos e interconectados con

destinos tales como la escuela, el trabajo y los centros de ocio, entre otros; representando un gran ahorro social, debido a que disminuyen los tiempos de traslados.

La demanda de transporte en la Ciudad de México se ha visto influenciada, en los últimos años, tras las medidas adoptadas por el gobierno, para disminuir las emisiones contaminantes. Como por ejemplo: desincentivar el uso del automóvil, por medio de la aplicación de programas de verificación y de restricción vehicular. Uno de ellos es el programa “Hoy No Circula”, el cual se aplica en toda la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que está conformada por la Ciudad de México, sesenta municipios aglomerados (uno de ellos en el Estado de Hidalgo) y los restantes del Estado de México; y ha acelerado la renovación del parque vehicular.

La Ciudad de México anteriormente estaba comprendida totalmente en el Distrito Federal, el cual, empezó a rebasar sus límites desde los años cuarenta, extendiéndose al Estado de México y a un municipio del Estado de Hidalgo. Para el año 2000, la zona metropolitana se extendía sobre una superficie de 1.500 kilómetros cuadrados, de los cuales, más de la mitad se situaba fuera del Distrito Federal, en los municipios conurbados del vecino Estado de México. Si bien es cierto que el límite entre las dos entidades no es una realidad en el plano físico, éste cobra sentido en otros ámbitos, como el político y el de gestión urbana, sobre todo. Las autoridades del Distrito Federal han intentado, desde hace varios años, la urbanización en las periferias del sur de dicha región, con un éxito relativo. Sin embargo, ocurre todo lo contrario en la parte de la ciudad, ubicada en el Estado de México (Paquette; et al, 2009, 98-99).

El Gobierno del Distrito Federal ha desarrollado una serie de proyectos para la optimización del servicio de transporte en la ciudad. Entre ellos, la ampliación del STCM, la construcción del Tren Ligero, el servicio de Trolebús y la puesta en marcha de un sistema BRT, denominado Metrobús; el cual se analizará posteriormente.

Figura 3

Plano esquemático del sistema del Metrobús



Fuente: Sistema de Transporte Metrobús, 2014.

### 5.1.1 Necesidades de movilidad

En la actualidad, movilizarse diariamente es un asunto prioritario para la producción y para la productividad; para la seguridad física y emocional de las personas; y para el desarrollo de casi todas las funciones humanas. Por ello, las actividades de la población y su ubicación, en las grandes ciudades y zonas metropolitanas, como es el caso de la ZMVM,

generan la necesidad de una permanente y creciente movilidad; y es responsabilidad de las autoridades, facilitar, por medio de la ordenación de los usos del suelo, la creación de infraestructuras y la organización de los desplazamientos, que se realizan en el transporte público y en los automóviles (Iracheta, 2011, 133-134).

La separación física entre las distintas funciones urbanas; la necesidad creciente de comunicarse, por parte de los ciudadanos; y la falta de una disciplina, para ordenar y para desarrollar las redes viales y las del transporte público, han tenido consecuencias. Por una parte, una tendencia a la reducción en la capacidad de movilización de las personas; y, por la otra, una disminución de su acceso a los servicios e infraestructura que la ciudad brinda. El Fideicomiso de Estudios Estratégicos sobre la Ciudad de México (2000) estimó que el parque vehicular de la ZMVM alcanzará cerca de 5.6 millones de vehículos en el año 2020; correspondiendo a automóviles particulares aproximadamente cinco millones (89.3%). Esto denota que el uso del coche particular es creciente y deriva de una cultura individualista y de una industria en expansión, que no considera las necesidades de la comunidad, de la ciudad ni del medio ambiente. En todas las ciudades, la tasa de motorización crece por encima de la del transporte público, e incluso por encima de la tasa de crecimiento de la población. Al no existir una estrategia proporcional y paralela de construcción de vialidades, es posible imaginar, en el futuro, la casi paralización del tránsito urbano, por periodos cada vez más prolongados, hasta límites que pueden llevar al desquiciamiento social, por las consecuencias en la economía, las relaciones sociales y la salud física y emocional de la mayoría de los ciudadanos. La carencia de infraestructura de transporte masivo adecuada y de un servicio de transporte público de calidad, ha llevado al sector de la población, con mayor nivel de ingreso, a adquirir y a mantener un vehículo privado; y a optar por su uso, como un mal necesario. Los habitantes urbanos de menores ingresos no tienen más opción que hacer uso del transporte público, porque el coste es más compatible con su nivel de ingreso. Así, deben convivir con las deficiencias de ese transporte, movilizándose predominantemente en vehículos de servicio público de baja capacidad y poco seguros, con una mala calidad del servicio y alto riesgo de accidentes y asaltos (Iracheta, 2011, 134-136).

La rutina diaria (compras, ocio y relaciones sociales) de los habitantes de la ciudad, como factor de movilidad, depende del nivel de ingreso. Es decir, un mayor poder adquisitivo se asocia frecuentemente con fuertes tendencias de expansión, como la dispersión de sitios de áreas residenciales, industriales y comerciales, a través de las zonas urbanas. Las necesidades de movilidad de los habitantes de la ZMVM son muy variadas. La encuesta origen-destino, realizada por los gobiernos locales del Distrito Federal y del Estado de México, concluyó que durante un día hábil se efectúan casi 22 millones de viajes, de los cuales 14.8 millones se llevan a cabo en transporte público y 6.8 millones en transporte privado. Por entidad federativa, el 58.4% se llevan a cabo en el Distrito Federal y 41.3% en el Estado de México. De los viajes que se producen en el Distrito Federal, el 83% tienen su destino dentro de la ciudad y el 17% lo tiene en el Estado de México. Con respecto a los modos de transporte utilizados por los habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), el transporte público llamado “colectivo” (o también denominado microbús), es el más concurrido. El 65% de los viajes efectuados son a través de este modo. A su vez, el 17% de los viajes son efectuados por Taxi, el 8% a través del Metro, 7% por medio del Tren Suburbano, 2% por Autobuses, 1% por Trolebús y sólo el 0.5% son efectuados por Metrobús. Estos resultados son producto del grado de conurbación entre ambas entidades; ya que parte de la población de la ZMVM debe recorrer grandes distancias para cumplir su rutina diaria y así llegar a su destino de trabajo, de ocio y de residencia (Gobierno del Distrito Federal; et al, 2007, 7-9).

En lo que respecta al transporte privado, los viajes efectuados por automóvil se ubican en el 92.3%, mientras que aquellos en bicicleta alcanzan 6.4% y el uso de la motocicleta fue el de menor concurrencia por los habitantes de la ciudad, al llegar a 1.4%. Los motivos para utilizar dicho modo de transporte son volver a la residencia habitual (44.9%), mientras que los viajes por trabajo se ubican en 25.5%; y los desplazamientos a escuelas y a universidades alcanzan el 8.8% (Gobierno del Distrito Federal; et al, 2007, 12).

El proceso de urbanización en la Ciudad de México se ha transformado de preeminente a policéntrico, y de metropolitano a megalopolitano, manteniéndose la estructura desigual del espacio. En general, las ciudades en México se encuentran cada día más desordenadas. En

ellas crece la irregularidad, la informalidad y la ilegalidad de los asentamientos humanos y de las actividades productivas. En el caso del transporte público se empieza a reconocer que la irregularidad es un fenómeno creciente. Por otro lado, la insuficiencia de políticas urbanas y de transporte, en la mayoría de las ciudades, hace evidenciar que la situación es compleja y grave.

El servicio de transporte público masivo sigue siendo uno de los principales retos de la agenda en México; ya que en las urbes importantes del país se generan cada día más viajes/persona/día, los cuales se llevan a cabo de una manera costosa e ineficiente, a través de automóviles privados con promedios de ocupación cercanos a un pasajero y de autobuses, combis y microbuses de muy bajas especificaciones, que contribuyen con la mayor parte de la oferta de viajes. Esto ha constituido una distorsión en la estructura modal del transporte. Los automóviles privados generan el mayor impacto urbano y, en conjunto, contaminan más; mientras que el transporte público absorbe la proporción más grande de la demanda y no representa ninguna solución al problema de accesibilidad y de movilidad en las ciudades.

Un creciente número de ciudades, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, han comenzado a implementar políticas de gestión de la movilidad (también llamada gestión de la demanda de transporte), para reducir los viajes urbanos en automóvil y promover el uso de otros modos de transporte. Estas políticas incluyen cambios en la inversión en infraestructura de transporte, mayores impuestos a los vehículos y al combustible, cambios en el diseño de las calles en favor de modos alternativos, y restricciones o cuotas por usar el automóvil en algunas áreas. De hecho, la mayoría de las ciudades grandes están implementando al menos algunas estrategias de gestión de la movilidad. Las políticas de gestión de la movilidad se pueden justificar de varias maneras. Ente ellas, como el cobro eficiente de vías y estacionamiento y prácticas de inversión, donde se escoja la opción de menor coste; como soluciones a problemas como la congestión vial y de estacionamiento y las emisiones contaminantes; como una forma de lograr objetivos de equidad, como mejorar la accesibilidad para quienes no conducen y reducir las externalidades que el uso del automóvil impone a la sociedad. La Ciudad de

México tiene características que la hace candidata para la gestión de la movilidad, debido a que experimenta una severa congestión vial y de estacionamiento, accidentes de tránsito y problemas por emisiones contaminantes. Los gobiernos locales enfrentan los crecientes costes de expandir las vías y el estacionamiento, la calidad de los modos alternativos (caminar, bicicleta y el transporte público) es actualmente inferior, por lo que hay un alto potencial de mejora. La posesión de automóviles y el volumen de tráfico están creciendo rápidamente, una porción significativa de la población no puede costear tener un automóvil y usarlo como modo primario de transporte, se arriesga a tener un desarrollo económico reducido. Si el consumo de combustibles aumenta, junto con los precios del petróleo, provocará que las áreas urbanas tengan que enfrentar altos costes de importación de combustible (Litman, 2012, 10-11).

La dependencia del automóvil y las consecuentes altas tasas de motorización tienden a imponer costes a la sociedad, incluyendo la congestión vial y de estacionamiento, altos costes para los consumidores y precios inasequibles (que se imponen a los hogares de menores ingresos), altos costes de infraestructura vial, tasas de accidente, dependencia energética y emisiones contaminantes. Además, el rápido aumento de la motorización y uso del automóvil en las ciudades mexicanas tiene como resultado congestión vial y de estacionamiento, accidentes y contaminación (Litman, 2012, 12).

La congestión urbana mantiene un equilibrio, si se vuelve muy pesada, desalienta los viajes en automóvil. Si las alternativas no son de buena calidad, pocos conductores cambiarán de modo y la congestión será severa. Si son atractivas, es más probable que los conductores cambien de modo y reduzcan el equilibrio de la congestión. Mientras más rápido sea el servicio de transporte público, más altas serán las velocidades en las autopistas urbanas paralelas. Los tiempos de traslado de puerta a puerta para los conductores tienden a converger con los tiempos de traslado del transporte público con carriles o vías exclusivas. Una red comprensiva de BRT es una de las soluciones a los usuarios existentes de transporte público, la cual atrae usuarios nuevos que de otra forma utilizan su automóvil. Esto ayuda a reducir la congestión vial y de estacionamiento y otros problemas de tráfico con una amplia gama de beneficios (Litman, 2012, 33).

## 5.2 Sistema de Autobuses de Tránsito Rápido

El transporte representa una de las mayores necesidades de la economía. Es un medio crucial, por el cual los ciudadanos pueden acceder a bienes y servicios, además de ser uno de los motores que impulsa el desarrollo; ya que comunica y moviliza a las personas, a las cargas y, en general, a todos los recursos, por lo que es necesario un sistema de transporte público que sea eficiente. Para la mayoría de los habitantes de las ciudades, dicho sistema es la única forma práctica para acceder al empleo, a la educación y a los servicios públicos; especialmente cuando estos servicios se encuentran a distancias que no pueden ser recorridas a pie o en bicicleta.

Se requieren alternativas de transporte público de alta calidad y que no representen una gran deuda para los gobiernos locales. Los sistemas BRT han demostrado ser uno de los mecanismos con un coste-beneficio favorable para que las ciudades desarrollen rápidamente un sistema de transporte público, que ofrezcan un servicio rápido y de alta calidad. Este concepto ha ofrecido potencial para revolucionar el transporte urbano.

### 5.2.1 ¿Qué es?

Al sistema BRT se le define como un sistema de alta calidad, basado en autobuses que proporcionan movilidad urbana rápida, cómoda y de relación favorable coste-beneficio, a través de la provisión de infraestructura de carriles segregados, operación rápida y frecuente y excelencia en el mercadeo y en el servicio al cliente. Este sistema emula las características de desempeño y amenidad de un sistema moderno basado en rieles, pero a una fracción del coste. Un sistema BRT, cuesta de cuatro a veinte veces menos que un Sistema de Tren Ligero (*Light Rail Train*, LRT, por sus siglas en inglés) y entre diez y cien veces menos que un sistema tipo Metro. Ha sido implantado alrededor del mundo a través de distintos nombres, incluyendo los Sistemas de Autobuses de Alta Capacidad (*High-Capacity Bus Systems*), Sistemas de Autobuses de Alta Calidad (*High-Quality Bus Systems*), Metrobús, Metro de Superficie, Sistemas Expresos de Autobuses (*Express Bus Systems*) y Sistemas de Carril Segregado (*Busway Systems*). Pese a que los términos pueden variar entre países, se sigue una misma premisa básica, que es un servicio de alta calidad de

transporte público, competitivo con los automóviles, a un coste asequible (Institute for Transportation and Development Policy, 2010, 12).

Existen diversos documentos que han contribuido con definiciones del sistema BRT. Entre ellas se incluyen la brindada por Levinson (2003), que indica que dicho sistema es un modo de transporte masivo flexible, con llantas de caucho, que combina estaciones, vehículos, servicios, carriles y elementos de los ITS, en un sistema integrado, con una identidad positiva fuerte, que evoca una imagen única. Por otra parte, Wright (2001) menciona que el sistema BRT es un sistema de transporte masivo de alta calidad, orientado al usuario, que proporciona movilidad urbana rápida, cómoda y relación favorable coste-beneficio. Así mismo, Thomas (2001) lo define como un modo de transporte rápido, que puede combinar la calidad del transporte férreo con la flexibilidad de los autobuses.

Algunas de estas definiciones, tienden a sugerir que el sistema BRT, tiene mucho en común con los sistemas férreos; especialmente en términos de desempeño operacional y servicio al cliente. Éste ha logrado tomar características del sistema del Tren Ligero y del Metro, que son deseadas por los usuarios del transporte masivo y hacen estos atributos más asequibles a una amplia variedad de ciudades. La diferencia principal entre el sistema BRT y los sistemas férreos urbanos es que el BRT puede proporcionar servicios de transporte masivo de alta calidad, al coste que muchas ciudades pueden pagar. Muchos de los desarrollos del sistema BRT, en diversos países han demostrado que el objetivo último es mover a las personas, en lugar de los automóviles de manera rápida, eficiente y con relaciones coste-beneficio favorables (Institute for Transportation and Development Policy, 2010, 12-13).

### **5.2.2 Elementos que lo componen**

La infraestructura física está compuesta por diversos elementos, entre ellos carriles segregados o carriles sólo para autobús, predominantemente en el carril central; existencia de una red integrada de rutas y corredores; estaciones mejoradas que son convenientes, cómodas, seguras y protegidas a condiciones climáticas; estaciones que dan acceso a nivel entre la plataforma y el piso del vehículo; estaciones especiales y terminales que facilitan la integración física fácil entre rutas troncales, servicios de alimentación y otros sistemas de

transporte masivo y mejorías del espacio público circundante. A su vez, las operaciones se enfocan en brindar un servicio frecuente y rápido entre orígenes y destinos principales; tener capacidad amplia para la demanda de pasajeros, a lo largo de los corredores; abordaje y desembarque rápido de pasajeros; recaudo y verificación de la tarifa antes de abordar; e integración de tarifa entre rutas, corredores y servicios alimentadores. Por lo que se refiere a la estructura de negocios, ésta se enfoca en la entrada restringida al sistema a operadores prescritos bajo un negocio y estructura administrativa reformada; procesos licitados competitivamente y totalmente transparentes para adjudicación de contratos y concesiones; gestión eficiente que resulta en la eliminación o minimización de subsidios del sector público, hacia la operación del sistema; sistema de recaudación de la tarifa operado y gestionado independientemente; y seguimiento del control de calidad, por parte de una entidad o agencia independiente. La tecnología se basa en la utilización de vehículos de bajas emisiones y de bajo ruido; recaudo y verificación de tarifa automática; gestión del sistema a través de un centro de control centralizado, utilizando aplicaciones de ITS, tales como localización automática de vehículos, prioridad semafórica o separación de nivel en intersecciones (Institute for Transportation and Development Policy, 2010, 13).

Otro elemento importante se refiere al mercadeo y servicio al cliente, el cual enfatiza la identidad distintiva para el sistema; la excelencia en servicio al cliente y provisión de facilidades clave para los usuarios; la facilidad de acceso entre el sistema y otras opciones de movilidad (tales como personas a pie, bicicletas, taxis, transporte colectivo y vehículos motorizados privados, entre otros); la infraestructura especial para facilitar el acceso a grupos en desventaja física, tales como los niños, personas de la tercera edad y los discapacitados físicamente; provisión de mapas de rutas, señalización y/o pantallas de información en tiempo real claros, que son localizados de manera visible dentro de estaciones y/o vehículos. Las ciudades de tamaño pequeño y mediano pueden encontrar que no todas estas características son necesarias o fáciles de lograr dentro de las restricciones de coste (Institute for Transportation and Development Policy, 2010, 13).

### 5.2.3 Ventajas

Existen diversas ventajas de la implementación del sistema BRT, en comparación con otros sistemas de transporte (Hinebaugh, 2009, 4-1 y 4-2):

1. Aumento en el número de pasajeros, lo cual es un buen indicador de que el servicio es atractivo y adecuadamente diseñado.
2. Eficacia del logro de metas y de objetivos por unidad de inversión establecidos.
3. Eficiencia operativa, misma que sugiere qué tan bien apoyan el despliegue eficaz de los recursos, en el servicio a los pasajeros, los elementos del sistema BRT.
4. Desarrollo orientado al tránsito, que promueve la habitabilidad y la accesibilidad de las comunidades y el aumento del valor de las propiedades y de las comunidades que rodean las inversiones de tránsito.
5. Provee calidad ambiental, como indicador de la calidad de vida regional, que apoya la salud y el bienestar de la población y la capacidad de atracción y la sostenibilidad del medio ambiente urbano y natural.
6. Aumento en los ingresos, a partir de nuevos conductores, que cuenten con mayor conocimiento y experiencia; de las nuevas formas de recolectar las tarifas; o de las nuevas fuentes de ingresos auxiliares, tales como publicidad e información al pasajero.
7. Reducción de la congestión, al atraer a los automovilistas privados a utilizar otro medio de transporte, puede ayudar a reducir o limitar el crecimiento de la congestión y el tráfico.
8. Las mejoras en el diseño del sistema BRT ahorran tiempo a los pasajeros existentes; optimizan la movilidad de los nuevos pasajeros; y reducen la congestión en la red viaria y el tiempo para los usuarios de vehículos privados y para los transportistas de carga. Todo esto da lugar a productividad económica.
9. Mejora la calidad de vida de una región, al proporcionar alternativas de movilidad y mejorar el desarrollo de tránsito de apoyo.
10. Ofrece opciones de movilidad adicionales, que pueden aumentar las oportunidades de empleo a la población. Esto reduce costes asociados con modos de transporte más caros. Tanto los establecimientos minoristas y otros negocios pueden beneficiarse del aumento de las ventas y la disponibilidad de mano de obra.

11. La inversión en sistemas de transporte como el Autobuses de Tránsito Rápido (*Bus Rapid Transit*, BRT, por sus siglas en inglés), ha tenido impactos positivos directos en la creación de empleo enfocado a la construcción, planificación y diseño de las instalaciones.

**Figura 4**

**Andén de la estación de Indios Verdes (cabecera)**



Fuente: Elaboración propia, 31 de mayo de 2014.

#### **5.2.4 Tipología**

Determinar lo que califica a un sistema de transporte como el BRT, también puede ser más que la suma de sus características cuantitativas. Sin duda, la capacidad del sistema, las velocidades promedio de los vehículos y el tamaño de la red son determinantes para

proporcionar un servicio de alta calidad. No obstante, también se debe reconocer que muchas características de excelencia en servicios de transporte público son parcialmente de naturaleza cualitativa. Estas características pueden incluir: facilidad para acceder al sistema, comodidad de estaciones y vehículos, sensación de seguridad vial y personal del sistema, legibilidad y claridad de los mapas y señales del sistema, amigabilidad del personal y los conductores, reconocimiento amplio del nombre e imagen del sistema y limpieza y profesionalismo en general. Claramente hay más cosas en el transporte público que sólo mover a la gente (Institute for Transportation and Development Policy; et al, 2010, 14).

Existe una definición más específica para dicho sistema de transporte, el sistema BRT completo, que se refiere a un sistema que proporciona niveles ejemplares de servicio. Se define como un sistema que cuenta con carriles segregados o carriles solo-autobús, a lo largo de la mayoría de los corredores troncales o de centro de una ciudad, localización de los carriles en el carril central más no en el carril lateral. Presenta una red integrada de rutas y de corredores, de estaciones mejoradas, que son convenientes, cómodas, seguras y protegidas contra las adversidades climáticas y que proporcionan acceso a nivel entre la plataforma y el piso del vehículo. Estaciones y terminales especiales, que facilitan la integración física entre las rutas troncales, los servicios de alimentación y otros sistemas de transporte masivo. Recaudo y verificación de tarifa antes del abordaje, integración física y tarifaria entre rutas, corredores y servicios de alimentadores, entrada al sistema es restringida a operadores prescritos bajo una estructura de negocios y administrativa reformada e identidad de mercadeo distintiva para el sistema (Institute for Transportation and Development Policy, 2010, 15).

El sistema BRT, tiene poco en común con los servicios convencionales de autobuses. En gran parte del mundo, dichos servicios son lentos, poco frecuentes, poco convenientes, incómodos y reconocidos por su falta de estatus y servicio. Los servicios de autobuses tienen un estigma negativo, en lo que concierne al mal desempeño operacional y servicio al cliente inadecuado. El término BRT, no debería ser aplicado a sistemas que sólo hacen un esfuerzo marginal en mejorar el desempeño. Suele presentarse falta de mecanismos de cumplimiento de las normas ha hecho que los carriles de los autobuses no sean muy

efectivos, particularmente cuando están localizados en los carriles laterales (Institute for Transportation and Development Policy; et al, 2010, 22).

**Figura 5**

**Autobús arribando a la estación de Indios Verdes (cabecera)**



Fuente: Elaboración propia, 31 de mayo de 2014.

### **5.3 Experiencias internacionales**

Desde finales del siglo 20, el BRT se ha convertido en el principal medio de transporte urbano de pasajeros, en distintas partes del mundo, tales como América Latina, Estados Unidos, el sudeste de Asia, China, India, Francia e Inglaterra, entre otros. Esto debido a su capacidad de transporte de masas de forma rápida y a bajo coste. El sistema BRT, tiene todas las características necesarias para ofrecer un impacto positivo en el desarrollo económico, social y medioambiental. A su vez, es una forma emergente de transporte público, que une la velocidad y la fiabilidad de un servicio ferroviario con gran flexibilidad operativa y a menor coste, que un servicio de autobús convencional.

A continuación se exponen algunas experiencias internacionales del sistema BRT, remarcando su importancia como un emergente sistema de transporte urbano masivo, en diversas ciudades del mundo.

### **5.3.1 Colombia**

Durante años, Bogotá tuvo varios planes para la construcción de un sistema de transporte por ferrocarril (tipo Metro), pero nunca se llevó a cabo. A principios del año 1990, se abandonó la idea del Metro y fue construido un carril de autobús, por separado, a lo largo de una de las calles, la Avenida Caracas. Dicho carril se encontraba abierto a cualquiera de los miles de autobuses privados que corrían por todo Bogotá. El gobierno local inicialmente apoyó el plan maestro con un sistema de transporte masivo, para lograr un acuerdo del gobierno federal para financiar el 70% del mismo. A finales del año 2000, comenzó Transmilenio Fase 1, transformando la Avenida Caracas en un sistema BRT, abriendo otro corredor, ubicado en la Calle 80, y dejando un tercer corredor en construcción. Este sistema BRT, poseía una capacidad y una velocidad comparable a la mayoría de los sistemas de Metro y fue capaz de mover 46,000 pasajeros por hora, por dirección, en horas pico, en el corredor de Avenida Caracas. Junto con la construcción de este sistema BRT, el gobierno local instituyó medidas para mejorar el medio ambiente urbano. Entre ellas, la reubicación de los vendedores informales, que ocupaban las zonas públicas y las calles; la mejora de todos los parques de la ciudad; y la construcción y la renovación de algunas de las avenidas más importantes de la ciudad (Turner, 2012, 8).

Transmilenio está dotado con estaciones, puentes y plazoletas de acceso peatonal especial; y específicamente diseñados para facilitar a los usuarios el acceso al sistema y renovación del espacio público urbano. La operación se lleva a cabo con equipos de transporte que tienen especificaciones funcionales y técnicas particulares. Para su operación, el sistema se dotó principalmente con vehículos articulados, que tienen especificaciones adecuadas a las características de la infraestructura que se utiliza para su funcionalidad, y al diseño operativo del sistema. La operación se realiza bajo un esquema de gestión que combina de manera organizada los dos anteriores elementos bajo un solo sistema, para transportar un alto volumen de pasajeros, y así dar respuesta a sus necesidades de movilización. En los

corredores troncales la operación es desarrollada por empresas privadas, al igual que en las rutas alimentadoras del sistema, bajo la coordinación del gestor (Instituto de Desarrollo Urbano, 2012, 2).

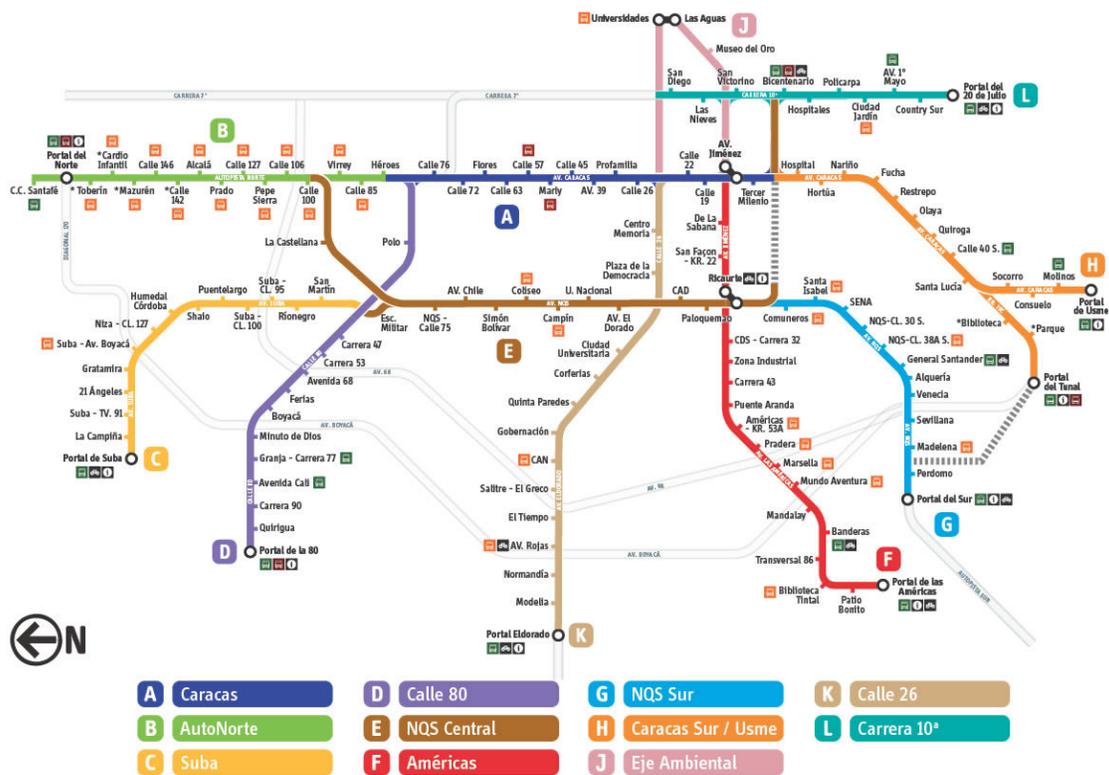
La fase uno de Transmilenio abarcó un total de 41 kilómetros, mientras que la fase dos añadió 43 kilómetros de corredores BRT exclusivos. Estas dos primeras fases del sistema incluyen rutas alimentadoras, que llegan a los corredores; y un sistema de tarjetas de tarifa integrada, para permitir el servicio de traslado gratuito. La fase tres está en construcción y se prevén más corredores, ampliando la longitud de las vías del autobús a 388 kilómetros (Turner, 2012, 8-9).

El sistema Transmilenio es administrado por una autoridad de transporte público, denominada Transmilenio S.A., que otorga contratos a empresas privadas de autobuses. El gobierno local es el responsable del carril particular de autobuses y de la infraestructura de las estaciones; mientras que diferentes empresas privadas compran y operan los autobuses y proporcionan los conductores; y otra compañía recolecta las tarifas. Existen operadores troncales, a los cuales les paga en base a que el factor más importante es el número total de kilómetros que sus vehículos operan. Los autobuses tradicionales no pueden transitar en los carriles de Transmilenio. Este sistema de transporte reemplaza a más de 9,000 autobuses viejos e ineficientes con más de 1.200 autobuses modernos de gran capacidad. A su vez, también opera un centro de control equipado con doce estaciones de trabajo, cada una capaz de controlar ochenta autobuses articulados, lo que permite la planificación y la supervisión en tiempo real de las operaciones de los autobuses. Cada autobús cuenta con un ordenador conectado a un GPS, al odómetro y al sistema de apertura de puertas. El equipo informa de la ubicación del autobús, cada seis segundos, con una precisión de dos metros. Los operadores de control tienen una pantalla de monitoreo para cada servicio en visualización esquemática y un mapa digital que muestra la ubicación física de los autobuses. El software es capaz de verificar el cumplimiento de lo previsto, dando la oportunidad a los controladores de hacer los ajustes de demanda y oferta en tiempo real. La información del servicio en tiempo real se visualiza en tableros electrónicos dentro de cada autobús. Entre los resultados que dado la puesta en marcha de Transmilenio, el tiempo

promedio de viaje de los residentes de Bogotá se ha reducido en unos veinte minutos, lo que representa una disminución del 32%. También se han producido reducciones significativas de los accidentes de tráfico mortales. Un estudio realizado por el *Urban Land Institute* en 2008 concluyó que el valor de la propiedad, alrededor de las estaciones de Transmilenio tiene un precio mayor entre el 15 y 20% respecto a otras zonas de esa ciudad (Turner, 2012, 9-10).

**Figura 6**

**Mapa de rutas del sistema Transmilenio**



Fuente: Transmilenio, mapa del sistema, 2014, disponible en: <http://www.transmilenio.net.co/mapa.html>.

### 5.3.2 Brasil

Brasil es considerado como el pionero en la utilización de otras alternativas de transporte como el sistema BRT; particularmente Curitiba, que fue la primera ciudad en desarrollar dicho sistema en 1974. En la actualidad, la *Rede Integrada de Transporte (RIT)* posee una red de 790 kilómetros de extensión y cubre el 75% de la demanda de una manera eficiente

del área metropolitana. De acuerdo a datos del *International Institute for Energy Conservation*, Curitiba consume 25% menos de combustible que otras ciudades del mismo tamaño. Algunos elementos que influyen en el funcionamiento y en la organización del sistema BRT son el funcionamiento de líneas directas; y, por otro lado, los tipos de línea de autobuses y las líneas alimentadoras (Zamora Colín, 2013, 114).

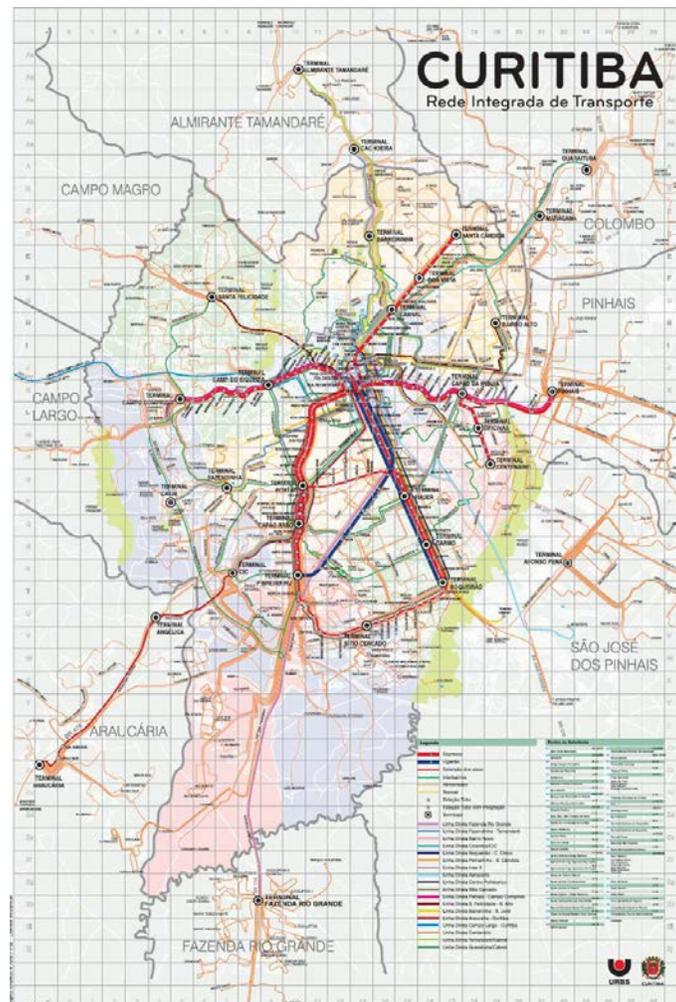
Las líneas directas son parte del sistema de transporte público de Curitiba y del sistema BRT y usan las paradas normales. En estos recorridos se paga la tarifa antes de que los pasajeros suban al autobús, a fin de reducir el tiempo de parada; ya que éstos suben y bajan por medio de una plataforma a nivel, lo que provoca un aumento de la velocidad operacional. Los autobuses de la línea directa paran en las estaciones que están formadas por un cilindro de vidrio y acero, equipado con una casilla rotatoria en las partes delanteras y traseras, un espacio para el cobrador y un área de espera para facilitar la operación. Las rutas establecidas pasan por las terminales de integración del sistema BRT, ubicadas en los ejes de desarrollo de la ciudad y en puntos donde la actividad urbana se concentra masivamente. Los elevadores del paradero también sirven para el acceso con coches para bebés, ancianos y personas con discapacidades temporales. En algunas terminales de integración se entra por rampas con un máximo de 8% de declive. Con respecto a las líneas alimentadoras, son líneas cortas que conectan a los barrios aledaños con las terminales de integración (Zamora Colín, 2013, 114-115).

Existen diversos tipos de líneas de autobuses. Las líneas inter-barrios, son circulares en ambos sentidos; tienen una conexión entre barrios, sin pasar por el centro de la ciudad; y empezaron en el año 1979. Las líneas expresas presentan un recorrido por calles exclusivas para autobuses; cuentan con paradas, cada quinientos metros, en estaciones de integración; y son operadas por autobuses biarticulados con capacidad de 270 pasajeros. Las líneas directas son conocidas como *Ligeirinhos* y fueron introducidas en el año 1991. Éstas conectan las terminales de integración, recorriendo la ciudad de punta a punta, operadas por autobuses biarticulados de color amarillo. Las líneas convencionales son las que atienden zonas de menor población, mientras que la línea turismo recorre 22 puntos turísticos, en dos horas, lo cual abarca una extensión de cuarenta kilómetros. Finalmente, la línea hospitalaria

que recorre los distintos hospitales de la ciudad. En cuanto a las estaciones, el sistema BRT, cuenta con 351 estaciones tubulares, habiendo gran extensión y cantidad de las mismas (Zamora Colín, 2013, 115-116).

**Figura 7**

**Mapa de rutas de la *Rede Integrada de Transporte***



Fuente: RIT, mapa del sistema, 2014, disponible en: <http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br>.

### 5.3.3 China

En el año de 2010, la ciudad de Guangzhou, ubicada en el suroeste de China, abrió su primer corredor del sistema BRT. Su longitud es de 22.5 kilómetros, teniendo como objetivos reducir el tráfico, en una de las calles más transitadas de la ciudad, la Avenida

Zhongshan; y, por otra parte, mejorar la eficiencia del sistema de autobuses de la ciudad. En la actualidad, su sistema BRT, tiene alrededor de 805,000 abordajes diarios, lo que lo ha convertido en el corredor de autobuses más utilizado en Asia. Tras un año de operación desde su puesta en marcha, ha dado lugar a una mejora en los tiempos de viaje de los pasajeros y en los conductores en un 29% y 20% respectivamente, dando lugar a un ahorro de tiempo anual de 52 millones de horas. Aunado a esto, la ciudad creó una nueva vía verde de alta calidad a lo largo del corredor del sistema BRT, proporcionando estacionamiento para bicicletas en cada una de las estaciones y en lugares en los barrios adyacentes. Esto significa que el sistema BRT, puede atraer a los pasajeros de un radio más amplio (Zhu, 2011, 2).

Cabe destacar que la planificación preliminar del sistema BRT en Guangzhou, comenzó en el año 2003; teniendo en cuenta que no existía ningún ejemplo de ese tipo de sistema de transportes de alta capacidad en China. Para 2005, se realizó un análisis de la demanda y una comparación entre otros corredores del sistema BRT y se concluyó que la Avenida Zhongshan proporcionaría el mayor ahorro de tiempo para los pasajeros, cubriría la alta demanda, mientras que aliviaría la congestión ocasionada por el tráfico. En el año 2008 se terminó la planificación de la ubicación de las estaciones, los planes operativos básicos, la planificación institucional del sistema BRT, la arquitectura de las estaciones, la ingeniería vial, y la planificación de la integración multimodal con el Metro, las ciclovías y las aceras. Toda la infraestructura relacionada con el sistema BRT se construyó en el año 2009, mientras que se continuó trabajando para el sistema de recolección de tarifas, los ITS, el refinamiento de las operaciones, la adquisición de vehículos, la difusión pública y las medidas auxiliares, como el aparcamiento y el diseño urbano (Zhu, 2011, 4).

El corredor del sistema BRT, en Guangzhou tiene 26 estaciones, las cuales permiten múltiples sub-paradas y rutas exprés, y están diseñadas y dimensionadas de acuerdo a los flujos de demanda de pasajeros y a los autobuses proyectados. El acceso a las estaciones cercanas al centro (que son de mediano tamaño) es a través de una combinación de puentes peatonales, cruces a nivel y túneles peatonales, que tienen comunicación con el Metro. Las intersecciones a lo largo del corredor tienen restringidos las vueltas a la izquierda. El

sistema, a su vez, utiliza un servicio directo o plan operativo flexible, que permite a los autobuses entrar y salir de los carriles exclusivos, en lugar de realizar transferencias hacia o desde las rutas alimentadoras. Durante el año 2010, la flota de autobuses del sistema BRT tenía un diámetro de doce metros de largo, mientras que los autobuses de piso bajo eran propulsados por gas licuado de petróleo y de fabricación nacional. Asimismo, los autobuses tienen puertas de embarque frontal y trasera y cuentan con una capacidad de entre 28 y hasta 36 asientos, aunque en ocasiones presentan una ocupación de hasta 2.5 veces más que el número de asientos. A partir del año 2011 se amplió la capacidad de los autobuses, contando con unidades de hasta 18 metros de largo y con tres puertas de embarque. Las estaciones y los autobuses están equipados con ITS que soportan la señalización de la llegada a la estación a tiempo real y permiten un seguimiento y control centralizado. El sistema BRT de Guangzhou está totalmente integrado con otros modos de transporte. Es el primero en el mundo en tener una conexión de túnel directo, con una estación de metro-ferroviario (Zhu, 2011, 5-9).

En el caso de Beijing, la Línea 1 del sistema BRT, inició sus operaciones en diciembre del año 2004. La línea piloto contaba solamente con 5.5 kilómetros de longitud en la primera etapa. Para diciembre del año 2005, la Línea 1 inició operaciones completas y se amplió a 16.5 kilómetros. La ruta comienza en Qianmen (centro de la ciudad) y termina en Demaozhuang (área sur de la ciudad), contando con 17 estaciones. El sistema cuenta con dos carriles exclusivos para autobuses (ida y vuelta), los autobuses tienen 18 metros de diámetro, son mono-articulados (con tres puertas para el abordaje), y se encuentran a nivel del piso. El servicio en horario normal comienza con dos autobuses en cada dirección cuyo tiempo de llegada es de minuto y medio en hora pico y en hora no pico de dos a tres minutos. La recolección de tarifa se lleva a cabo a través de una tarjeta inteligente y los billetes también pueden ser adquiridos con los empleados del sistema. Los ITS utilizados por el sistema son sistemas de monitoreo, de provisión de billetes, información a tiempo real para el pasajero y prioridad de las señales de tránsito. Entre sus objetivos se encuentran satisfacer la creciente demanda de viajes y proporcionar un servicio que ofrezca una opción más rápida y fiable para los pasajeros que viajen desde el centro de la ciudad a la zona sur.

A su vez, ha alcanzado alrededor del 40% de reducción del tiempo de viaje y aproximadamente 120,000 pasajeros diarios (Deng, 2010, 1186).

#### **5.3.4 India**

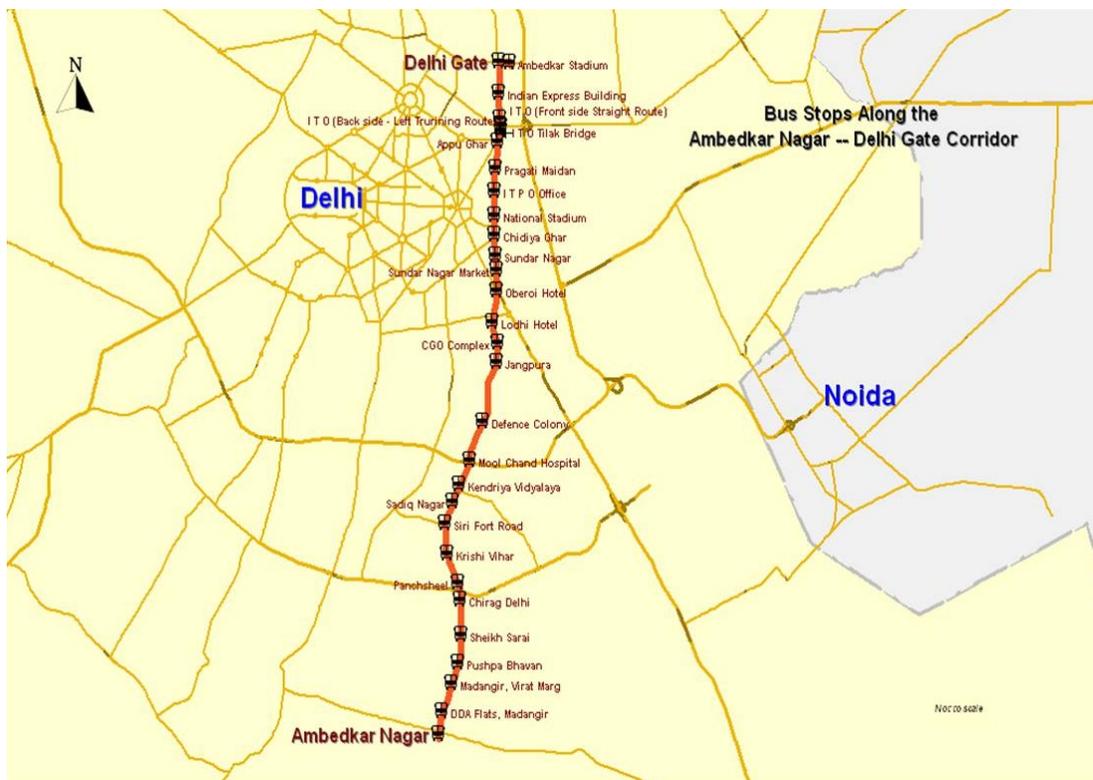
Existen varios casos representativos en la India, entre los que se encuentran el de Visakhapatnam, Vijayawada, Hyderabad y el de Nueva Delhi. La primera es una ciudad portuaria de rápido desarrollo en la costa de la Bahía de Bengala, la segunda es conocida por su gran producción agropecuaria, la tercera ha logrado introducir a la India dentro del sector de tecnologías de la información y la cuarta es la capital del país. En Visakhapatnam, el 90% de los 45 millones de vehículos registrados son automóviles y vehículos motorizados de dos ruedas. Siendo su demanda actual aproximada de viajes de 1.2 millones de personas por día, se estima que crezca a 2.8 millones de viajes diarios para el año 2021. En el caso de Vijayawada, la demanda se espera que crezca a 2.3 millones de viajes al día para el año 2012, en comparación a los 1.26 millones de viajes aproximados actuales. El proyecto BRT de Visakhapatnam comprende un corredor de 18.5 kilómetros con 38 uniones de tráfico y 48 estaciones de autobuses. Varios diseños se han propuesto, los cuales incluyen treinta metros dedicados al paso peatonal, carriles para automóviles y estaciones de autobuses, dedicándose 3.5 metros a los carriles exclusivos del sistema BRT, con plataformas para los pasajeros con un ancho de tres metros y carriles de paso también se proporcionan en las estaciones de autobuses. Se desarrollaron estimaciones de coste de construcción, requisito flota y el plan de operaciones. En el caso de la Vijayawada, comenzaron con seis rutas de las cuales la más larga es de 15.5 kilómetros y en el caso de Hyderabad, se construirán seis corredores, que suman 74.1 kilómetros (Ponnaluri, 2011, 270-271).

En el caso de Nueva Delhi, con una densidad aproximada de más de 10,000 personas por kilómetro cuadrado y más de 5.4 millones de vehículos motorizados registrados, el sistema BRT, de dicha ciudad es también un sistema de mediana duración con carriles dedicados y disposiciones para el transporte público intermedio y los peatones. Además de puentes y de túneles para un mejor acceso peatonal, aceras y jardines son aparte de las mejoras en la infraestructura carretera urbana. El diseño del sistema también considera la seguridad vial,

separando los modos no motorizados, especialmente las bicicletas y los peatones, del tráfico regular. Los autobuses presentan buena ergonomía y son de piso bajo, con mejor acceso para los usuarios minusválidos y son alimentados por gas natural comprimido. Así mismo, cuentan con sistema de navegación vía satélite (GPS), disponible en las estaciones y en todos los autobuses. Entre otras características, están la recolección automatizada de boletos, el mantenimiento periódico de los autobuses y la constante divulgación de información, para mantener informado al público, acerca de las características presentes y futuras del sistema BRT. El tramo inicial de seis kilómetros fue posteriormente ampliado a 14.5 kilómetros (Ponnaluri, 2011, 271-272).

**Figura 8**

**Mapa del sistema *Bus Rapid Transit* (BRT) de Nueva Delhi**



Fuente: New Delhi BRT System, mapa del sistema, 2014, disponible en: [http://www.dimts.in/Projects\\_Bus-Rapid-Transit.aspx](http://www.dimts.in/Projects_Bus-Rapid-Transit.aspx).

## **5.4 La respuesta en los sistemas de transporte en la Ciudad de México**

El Metrobús, como medio de transporte perteneciente al sistema BRT, tiene gran potencial como servicio de transporte masivo. Su desarrollo permite mejorar no sólo las condiciones del transporte público a un mejor coste en un menor tiempo, sino además impactar positivamente en el ámbito urbano, facilitar los cruces peatonales, crear corredores económicos activos y, en general, satisfacer necesidades de movilidad; lo que impacta positivamente en una mejor calidad de vida. En la actualidad, la red del Metrobús cuenta con 95 kilómetros de cobertura, habiendo crecido en años recientes al sumar 75 kilómetros y flexibilizándose con el circuito del centro histórico. Sin embargo, la expansión del Metro, las limitantes presupuestales y obstáculos en la negociación con transportistas han sido algunas de las causas que evitaron la ampliación más acelerada de la red. El Metrobús es un competidor del mal transporte público y de los automóviles en congestión. Tiene importantes ventajas presupuestales y de tiempo de implementación con respecto a otros medios de transporte como el Metro, aunque es natural que con una amplia red de Metro, como la de la Ciudad de México, sea fundamental ver la integración de ambos servicios, como un todo y procurar que su expansión se base en un balance coste-beneficio (Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México, 2012, 2).

Existen varias propuestas para la red del Metrobús. Entre ellas, la de expansión de la red del Metrobús con diez nuevas rutas. Entre los objetivos fundamentales de dicha expansión se encuentran ampliar la cobertura de red de transporte masivo; descongestionar los corredores del transporte, que se encuentren saturados; mejorar la conectividad de la red de transporte masivo; y mejorar la cobertura del transporte masivo en la zona central, entre otros. Todos éstos, adicionales a la mejora del espacio público, a la seguridad del usuario y a la reducción de tiempos de traslado (Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México, 2012, 2-3).

### **5.4.1 Antecedentes**

En la década de los ochenta, la ZMVM contaba con un sistema de transporte donde los vehículos de elevada capacidad como los trolebuses, el Metro y los autobuses estructuraban

el servicio público. La Ruta 100, que era operada por el entonces Departamento del Distrito Federal, contaba con cuatro mil vehículos, que prestaban servicio a los usuarios de la ZMVM y especialmente a la población de bajos ingresos. Además de la Ruta 100, existía un Sistema Troncal de Transporte Colectivo, operado por el Estado de México, que servía principalmente a los municipios de la gran periferia metropolitana. Estos sistemas de transporte, no sólo representaban soluciones para los grandes desplazamientos de la ciudadanía, sino que también eran un importante apoyo a las economías familiares, debido al subsidio en las tarifas de estos servicios públicos (Álvarez, 2005, 9).

Estos organismos fueron eliminados para dar paso a nuevas formas de transporte y así, satisfacer la creciente demanda de la población usuaria y los ciudadanos en general ocasionada por el crecimiento de la ZMVM. Pese a esto, algunas de las condiciones del transporte público (microbuses, autobuses urbanos y trolebús) que imperan en la actualidad son: unidades con diseño deficiente, paradas no respetadas que ocasionan desorden vial, competencia por el pasaje, vehículos con difícil accesibilidad e invasión de carriles (Álvarez, 2005, 11).

A principios del año 2002, el Gobierno del Distrito Federal gestionó con el Banco Mundial la obtención de recursos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial o *Global Enviromental Fund* (GEF), para financiar el desarrollo de la estrategia integral de transporte sostenible en la Ciudad de México. Se aprobó una donación para realizar estudios del proyecto: “Introducción de medidas ambientalmente amigables en transporte”. La Secretaría del Medio Ambiente firmó un convenio con el Banco Mundial, en el que se establecieron las condiciones financieras, operativas y de ejecución de dicho proyecto. La característica fundamental permitió obtener el financiamiento por parte del Banco Mundial, siendo su condición la de contribuir a mejorar la calidad del aire y a reducir las emisiones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), a través del mejoramiento del transporte público, en lo que se refiere a calidad del servicio, ordenamiento, eficiencia, comodidad y sustentabilidad financiera autónoma. Con el financiamiento obtenido por el GEF, se desarrollaron los estudios base que aportaron la información necesaria para el diseño del

Sistema de Corredores Estratégicos de Transporte (Flores, 2012, 37-38).

Con la creación de corredores estratégicos, el Gobierno del Distrito Federal, tiene como objetivo promover el transporte sostenible. Entre las metas planteadas se encuentran favorecer el uso más eficiente y climáticamente amigable de las distintas modalidades de transporte, haciendo énfasis en el transporte público de pasajeros y el transporte no motorizado; mejorar la calidad del servicio del transporte público para convertirlo en una opción competitiva ante el transporte privado; ordenar el sector transporte en el contexto espacial, organizacional y jurídico; instalar un sistema financiero que permita al sector autonomía y sostenibilidad económica en el tiempo; documentar y dejar evidencia de las bondades ambientales de este tipo de proyectos para su réplica en el mundo (Flores, 2012, 38).

#### **5.4.2 Objetivos principales**

El Metrobús tiene como objetivo principal la planeación, la administración y el control del Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros del Distrito Federal.

A su vez, existen otras razones relevantes, que justifican su propósito, entre las que se encuentran mejorar la movilidad en la Ciudad de México, mediante el establecimiento de un moderno sistema de transporte público eficiente, seguro, rápido, cómodo y eficaz; abordar la necesidad de transporte público, en los principales corredores de transporte de las zonas más congestionadas de la ciudad, lo que reduce el tiempo de viaje y mejora la calidad de los servicios existentes. Contribuir a la lucha contra el cambio climático, mediante la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero, lo cual se logra a través de un sistema de transporte más eficiente y por medio de nuevos autobuses que utilicen combustible limpio (New York City Global Partners, 2010, 1).

Asimismo, pretende mejorar la calidad de vida en la Ciudad de México, mediante la reducción de diversas externalidades, como la cantidad de tiempo perdido en la congestión; el número de accidentes, debido a la mejora de la organización del transporte público y la gestión; y la contaminación por materia de partículas, reduciendo así el número de casos de

enfermedades respiratorias entre los residentes y la contaminación acústica. Por otra parte, busca producir beneficios económicos, principalmente a nivel macroeconómico, mediante la reducción de los costes económicos de la congestión (New York City Global Partners, 2010, 1).

### **5.4.3 Organización**

El sistema de transporte Metrobús está conformado por empresas que brindan el servicio de transporte y empresas de recaudo; así como un organismo público descentralizado (Metrobús), encargado de administrar, de planear y de controlar el sistema de corredores de transporte. La organización del Metrobús se realiza por medio de una empresa especializada en la operación y en el mantenimiento de los sistemas y medios de pago; y de un fideicomiso privado de administración, que maneja la inversión y las fuentes de pago de los recursos generados por los diferentes corredores. Esto facilita la transparencia de los recursos, la seguridad financiera, la conciliación semanal de kilometraje recorrido y las reglas de operación de los diferentes corredores (Sistema de Transporte Metrobús, 2014).

Son tres las partes principales que conforman la organización del Metrobús. La primera se refiere a las empresas transportistas, que son las encargadas de comprar, de operar y de mantener los autobuses, tales como Red de Transporte de Pasajeros del D.F., Corredor Insurgentes S.A. de C.V., Rey Cuauhtémoc S.A. de C.V., Corredor Oriente-Poniente, Corredor Tacubaya-Tepalcates, Transportes Sánchez Armas Juan José S.A., Corredor Eje 4-17 de Marzo, Movilidad Integral de Vanguardia S.A. y Conexión Centro Aeropuerto S.A. de C.V. En segunda instancia están los fideicomisos privados, que son los que concentran y administran los recursos que se generan por el pago de tarifa; y es a través de éstos que se realizan las instrucciones de pago entre las empresas prestadoras de servicios del sistema, habiendo fideicomisos en las cuatro primeras líneas. Por último, están las empresas de recaudo, que son las responsables de la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de recaudo del sistema (máquinas expendedoras de tarjetas, torniquetes, validadores, cámaras de vigilancia y sistemas electrónicos para el procesamiento de información, entre otros); entre ellas están Banco Inbursa, Idear Electrónica y Movilidad Integral de Diseño S.A. (Sistema de Transporte Metrobús, 2014).

#### **5.4.4 Infraestructura**

Los componentes de la infraestructura del sistema BRT, al cual pertenece el Metrobús, incluyen la infraestructura de la vía del autobús, la infraestructura de los alimentadores, las estaciones, las estaciones de transferencia intermedia, las terminales, los patios, el centro de control, las señales de control de tránsito, la infraestructura de integración, el espacio comercial, los servicios públicos y el paisaje (Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México, 2012, 10).

Las estaciones intermedias de transferencia se refieren al tipo de instalación que permite transferencias entre servicios de alimentación y servicios de línea troncal; mientras que las estaciones de intercambio permiten transferencias entre diferentes rutas de línea troncal. Las terminales son grandes instalaciones, generalmente situadas al final de un corredor de línea troncal, que permite transferencias entre múltiples servicios alimentadores; y los patios son instalaciones que cumplen múltiples tareas del sistema, incluyendo estacionamiento de la flota, retanqueo de los vehículos, lavado de los vehículos, servicio y reparación de los vehículos, servicios para los empleados y apoyo administrativo para los operadores. Las instalaciones intermedias de estacionamiento permiten a un autobús estacionarse en sitios intermedios a lo largo de los corredores. La mayoría de los aspectos del tamaño de la estación y del diseño de las sub-paradas son determinados por el diseño operacional. El diseño funcional y el tamaño de la estación son una función del número proyectado de pasajeros que suben y bajan en cualquier estación particular, y la frecuencia de los autobuses que deben ser alojados en esa estación (Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México, 2012, 11-12).

#### **5.4.5 Corredor Insurgentes: Línea 1 del Metrobús**

La red actual del Metrobús comprende cinco líneas, que abarcan gran parte de la Ciudad de México y parte de ZMVM, las cuales son:

Línea 1: Indios Verdes - El Caminero

Línea 2: Tacubaya - Tepalcates

Línea 3: Tenayuca - Etiopía

Línea 4: Aeropuerto - Buenavista

Línea 5: Río de los Remedios – San Lázaro

En el año 2004, después de haber realizado un estudio técnico en la Avenida de los Insurgentes, se determinó la necesidad de la prestación del servicio del Metrobús, en virtud de que el transporte público de pasajeros era inadecuado para el volumen de la demanda que atendía. Los principales efectos negativos que presentaba eran: la dificultad de movilidad de los usuarios, la saturación de la vialidad y la generación de altos niveles de contaminación, provocando un deterioro de la calidad del aire y de la salud de la población. Dicha avenida cuenta con una longitud de 26 kilómetros, enlazando las carreteras federales de México-Pachuca y México-Cuernavaca, con doble sentido de tránsito y cuatro carriles por sentido en la mayor parte de su longitud, con una capacidad vial estimada de 6,400 vehículos por sentido por hora y un parque vehicular en operación de 350 unidades de transporte público (Flores, 2012, 43).

La longitud de la Línea 1 es de treinta kilómetros en ambos sentidos. En el año 2005, inició operaciones en su primer tramo de 19.7 kilómetros que comprendía la ruta de Indios Verdes a Dr. Gálvez, integrado por 36 estaciones, posteriormente se efectuó la ampliación sur en marzo de 2008 a El Caminero. Atiende seis delegaciones del Distrito Federal (Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Álvaro Obregón, Coyoacán y Tlalpan). Tiene conectividad con el Sistema de Transporte Colectivo Metro, el Tren Suburbano y el sistema Ecobici. Presenta una demanda de 440,000 usuarios por día, de los cuales el 15% eran antes usuarios del transporte privado (Sistema de Transporte Metrobús, 2014).

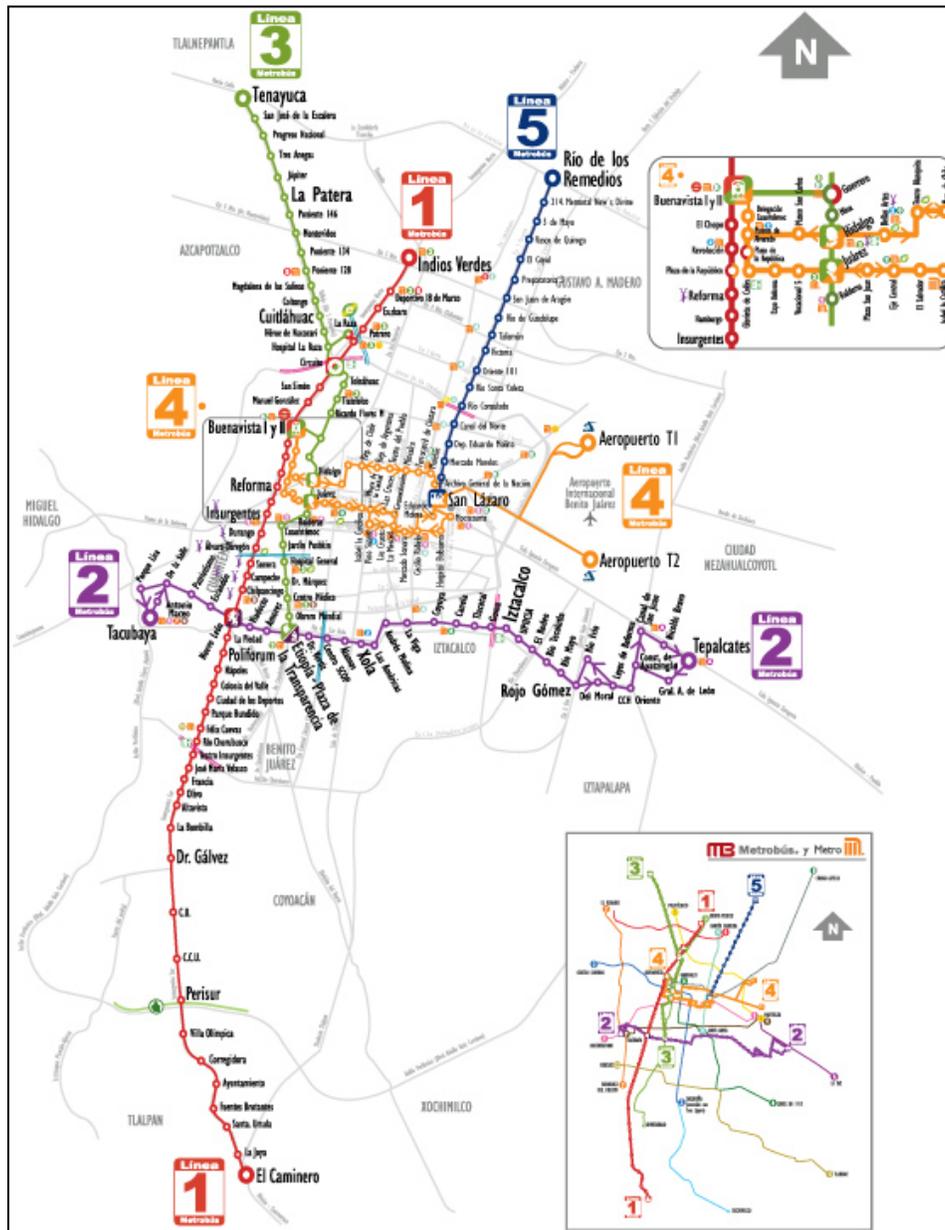
Entre las bondades de la Línea 1 del Metrobús se encuentran un aumento de la velocidad del transporte público al doble (de diez kilómetros por hora a veinte kilómetros por hora), los accesos y salidas de los autobuses promedian menos de 0.5 segundos por pasajero, ha conllevado a una reducción de 30% en accidentes relacionados al transporte público. De cara al futuro, Metrobús pretende una integración virtual, física y tarifaria, a través de un medio de pago único con tarifas integradas, minimización de los recorridos a pie en

transferencias de modo compartiendo estaciones y paradas, bici-estacionamientos en estaciones y paradas del sistema, estacionamientos de “*park and ride*” con tarifas integradas para el transporte público y accesibilidad universal. Uno de sus objetivos principales es la puesta en marcha de nueve líneas adicionales a las ya existentes, dando un total de catorce líneas, logrando en total 277 kilómetros. Entre los beneficios de la expansión de la red del Metrobús, se pretende ahorrar 290,000 horas de viaje diarias para el esparcimiento, la familia, el deporte y el estudio, mientras que en recorridos de tres horas, habría un ahorro de 72 minutos (Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México, 2012, 7-23).

En la figura de la página siguiente se presenta un mapa con las cinco líneas existentes del Metrobús:

Figura 9

Plano del sistema del Metrobús



Fuente: Metrobús, mapa del sistema, 2014, disponible en: <http://www.metrobus.df.gob.mx/mapa.html>.

Es importante destacar que la Línea 1 del Metrobús es víctima de su propio éxito, debido a que la creciente demanda, ha provocado serios problemas en el funcionamiento del sistema, las largas filas y los progresivos tiempos de espera, han dado lugar a que el abordaje sea una verdadera hazaña, aun cuando la proyección inicial del proyecto fue dar atención a

220,000 pasajeros diarios. Por otra parte, el tamaño de los autobuses es insuficiente ante la cantidad de usuarios que desean abordar uno de los vehículos, sobre todo en horario de alta demanda, lo que ha provocado incomodidad entre los usuarios, optando por otras formas de transporte (viajar a pie o la utilización del Metro). Lo que en un inicio pretendía hacer de recorrido en una hora, ha pasado a hacerse en hora y media, ante la demanda existente. El utilizar otra de las líneas del sistema no es una solución, debido a la también saturación y al poco abasto de los autobuses. Como segunda opción de transporte, muchos usuarios han utilizado otra de las líneas del sistema, lo cual tampoco reduce el tiempo de traslado.

Entre las probables soluciones se encuentran un crecimiento de la flota vehicular (articulados), ya que el número actual de autobuses no es suficiente. Otras propuestas incluyen un mando central, que logre una mejor programación de los viajes, servicios que no realicen paradas en todas las estaciones, trayectos que no comiencen en las estaciones iniciales e introducción de autobuses biarticulados, entre otras. De no implementar un remedio, ante la situación actual de la Línea 1, la misma podría quedar rebasada en un horizonte de tres años, es decir, para el año 2018.

**CAPITULO 6:**  
**DISEÑO Y ANÁLISIS DE MÉTODOS DE**  
**OPTIMIZACIÓN DE LOS SERVICIOS DE**  
**AUTOBUSES DE TRÁNSITO RÁPIDO:**  
**APLICACIÓN A LA LINEA 1 DEL METROBÚS**  
**EN LA CIUDAD DE MÉXICO**



## **6.1 Definición del problema**

Muchos son los beneficios que ha aportado el sistema de transporte Metrobús desde su puesta en marcha en la Ciudad de México, hace casi una década, mismos que se han citado con anterioridad. Ha sido un referente de modelo de movilidad urbana y de puesta en marcha de nuevas líneas transporte público. Sus bondades como un modelo de transporte eficiente, seguro y rápido, ha permitido a los ciudadanos de la capital mejorar las condiciones de sus traslados cotidianos, así como su seguridad, propiciando la disminución del número de automóviles y del volumen de las emisiones contaminantes, que afectan la salud de la población.

Pese a todo lo anterior, el Metrobús presenta problemas en su operación. Muchos de los autobuses articulados están divididos en dos vagones, el primero es destinado para el uso exclusivo de las mujeres, personas de la tercera edad e infantes, mientras que el segundo es para uso mixto. Uniendo los dos vagones la capacidad de este transporte es de entre 37 y 40 personas sentadas (dependiendo de la estructura interna) y por lo regular alrededor de 65 personas se encuentran de pie, lo cual denota un gran problema de falta de abasto en estas unidades, que no satisfacen la demanda de pasajeros en los horarios de mayor demanda.

Otros problemas, radican en la falta de señalización y de puentes peatonales que permitan el acceso más seguro a las estaciones. Existe una inadecuada ubicación de algunas de las estaciones comprendidas en el tramo central de la Línea 1 (Reforma a Perisur), debido a la gran proximidad entre ellas. Por otra parte, el aumento en las sanciones por invadir el carril confinado para el Metrobús y los recorridos de policías capitalinos para respetar el paso de ese medio de transporte, no han inhibido la invasión de conductores de automóviles particulares en el carril especial a lo largo de la Línea 1, en especial a lo largo de la Avenida de Insurgentes Sur.

Existen otros retos de cara a mejorar la operación del Metrobús:

- Falta de un sistema integrado de movilidad que permita la inter-modalidad entre los diversos sistemas de transporte público.
- Falta de transportación nocturna. Debe de considerarse que parte de los usuarios de dicho sistema de transporte, realiza sus actividades fuera de horarios pico.
- Diversas estaciones de la Línea 1, no cuentan con la infraestructura necesaria que permita el acceso de personas con discapacidad.
- Mejor capacitación de los conductores de autobuses con el fin de evitar accidentes, los cuales se han ocasionado por el confinamiento de los carriles.

La Línea 1 del Metrobús, ha presentado disminución de la velocidad media de los autobuses, en algunos casos más que representativos (de veinte a seis kilómetros por hora), lo que aunado a la semaforización, ha provocado aumentos en los tiempos de recorrido.

El Centro de Transporte Sustentable (2012), indicó que la saturación de la Línea 1 del Metrobús comenzó desde 2012, ante la falta de corredores viales paralelos a la Avenida de Insurgentes. Situaciones tales como problemas operativos en una de las líneas del Metro, la conexión con el tren suburbano y el abandono del uso del automóvil provocaron la migración de más de 200,000 pasajeros diarios a este servicio e indicó que la demanda del servicio ha tenido un crecimiento del 122%.

## **6.2 Metodología y fuentes**

Se llevo a cabo trabajo de campo para obtener los datos relativos al funcionamiento de la Línea 1 del Metrobús, en especial en horas pico. Se realizaron diversos recorridos en horarios diferentes, en los cuales se recabó información relacionada a los tiempos entre estaciones, tiempos de parada, de preparación y demandas entre estaciones.

Asimismo, se obtuvieron datos de los usuarios que abordaron y descendieron del autobús y aquellos que se quedaron sin poder abordar. La finalidad de este análisis recae en observar cuantas personas no tuvieron acceso al servicio, analizar los tiempos de recorrido (que incluyen los tiempos entre estaciones, de parada, etc.) con el fin de realizar una propuesta de optimización y mejora del servicio que ofrece Metrobús.

Se llevaron a cabo diversas visitas al Metrobús a lo largo de un mes, en las cuales se obtuvieron datos muy similares referentes a la operación, y se escogieron varios recorridos al azar. Las tablas 1, 2 y 3 son ejemplo de observaciones concretas, mientras que la tabla 4 del epígrafe 6.10 muestra valores medios.

A continuación se exponen las características de los recorridos efectuados con algunas particularidades:

### **Trabajo de Campo: Recorridos A y B**

1. El recorrido A se realizó el 17 de mayo de 2014, comenzando en Indios Verdes a las 14:20 horas y finalizó a las 15:22 horas (62 minutos de recorrido total).
2. El recorrido B se realizó el 21 de mayo de 2014, comenzando en El Caminero a las 18:06 horas y finalizó a las 19:13 horas (67 minutos de recorrido total).
3. Se eligió realizar la recogida de datos en los horarios anteriores, para tomar muestra de la afluencia en hora pico en fin de semana (recorrido A) y entre semana (recorrido B).
4. Los autobuses que circularon en el momento de realizar el trabajo de campo fueron articulados con una capacidad aproximada de 160 pasajeros.
5. El tiempo de llegada de cada autobús vacío en la estación de Indios Verdes fue de ocho minutos, mientras que en El Caminero fue de dos minutos.

6. Se presentó congestión en la estación de Glorieta de Insurgentes de hasta seis autobuses esperando para dejar pasajeros. El tiempo de espera alcanzó los cuatro minutos.
7. Cada autobús se espera cincuenta segundos en cada estación, tomando en cuenta la pérdida de velocidad por frenado al llegar a la estación y el arranque hasta tomar la velocidad normal al salir de la estación. Se presentó saturación de hasta dos unidades en algunas estaciones.
8. Las estaciones más concurridas se encuentran en el tramo “central” de la línea, el cual comprende de la estación de Reforma hasta Perisur y fue donde se observó mayor afluencia de pasajeros.
9. Se incluye en los resultados el dato de los usuarios que se quedaron sin subir en algunas estaciones, esto debido a la saturación de pasajeros en cada autobús. Llama la atención la estación de Indios Verdes, donde más usuarios se quedaron esperando.
10. Otro dato interesante recae en que la parte delantera del autobús es para uso exclusivo de mujeres, niños, personas de la tercera edad y discapacitados, mientras que la trasera es para el resto de los usuarios.
11. A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los trayectos.

**Tabla 1**  
**Datos del recorrido A**

<b>ESTACIONES</b>	<b>SUBIERON</b>	<b>BAJARON</b>	<b>SE QUEDARON SIN SUBIR</b>
Indios Verdes	60	75	60
Deportivo 18 de Marzo	0	15	0
Euzkaro	8	8	0
Potrero	0	12	10
La Raza	8	18	14
Circuito	8	16	12
San Simón	4	4	15

Manuel González	8	12	24
Buenavista	12	18	20
El Chopo	12	16	15
Revolución	16	12	30
Plaza de la República	20	10	10
Reforma	26	14	10
Hamburgo	28	16	10
Glorieta Insurgentes	30	10	40
Durango	4	0	5
Álvaro Obregón	8	0	4
Sonora	18	12	2
Campeche	2	4	2
Chilpancingo	23	2	7
Nuevo León	8	18	6
La Piedad	12	8	21
Poliforum	22	11	7
Nápoles	8	16	2
Colonia del Valle	20	8	12
Ciudad de los Deportes	14	14	5
Parque Hundido	16	8	3
Félix Cuevas	20	19	5
Río Churubusco	16	8	2
Teatro Insurgentes	0	8	0
José María Velasco	16	6	8
Francia	3	0	0
Olivo (cerrada por remodelación)	-	-	-
Altavista	19	9	11
La Bombilla	8	12	11
Doctor Gálvez	18	14	15
Ciudad Universitaria	8	8	0
Centro Cultural Universitario	0	1	0
Perisur	15	26	8
Villa Olímpica	4	4	0
Corregidora	12	12	1
Ayuntamiento	8	13	0
Fuentes Brotantes	4	12	0
Santa Úrsula	0	12	0
La Joya	0	32	0
El Caminero	25	40	0

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos en el recorrido A, el 17 de mayo de 2014.

**Tabla 2**  
**Datos del recorrido B**

<b>ESTACIONES</b>	<b>SUBIERON</b>	<b>BAJARON</b>	<b>SE QUEDARON SIN SUBIR</b>
El Caminero	18	43	0
La Joya	0	0	0
Santa Úrsula	2	0	0
Fuentes Brotantes	5	1	0
Ayuntamiento	11	2	0
Corregidora	0	1	0
Villa Olímpica	18	0	8
Perisur	28	12	9
Centro Cultural Universitario	8	1	0
Ciudad Universitaria	24	8	0
Doctor Gálvez	10	15	12
La Bombilla	4	2	0
Altavista	3	3	5
Olivo (cerrada por remodelación)	-	-	-
Francia	4	8	0
José María Velasco	8	10	2
Teatro Insurgentes	6	0	0
Río Churubusco	8	16	0
Félix Cuevas	27	8	15
Parque Hundido	16	0	10
Ciudad de los Deportes	16	8	12
Colonia del Valle	12	10	40
Nápoles	19	5	17
Poliforum	16	16	20
La Piedad	8	2	16
Nuevo León	20	12	5
Chilpancingo	12	17	5
Campeche	0	7	2
Sonora	3	2	0
Álvaro Obregón	2	3	0
Durango	6	4	4
Glorieta Insurgentes	8	25	30
Hamburgo	16	15	7
Reforma	19	17	12
Plaza de la República	18	7	4
Revolución	10	21	26
El Chopo	13	7	17
Buenavista	12	29	18
Manuel González	21	6	21

San Simón	18	12	12
Circuito	18	14	18
La Raza	21	5	14
Potrero	25	0	12
Euzkaro	29	0	2
Deportivo 18 de Marzo	50	0	0
Indios Verdes	63	75	56

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos en el recorrido B, el 21 de mayo de 2014.

### **Trabajo de Campo: Recorrido C**

1. El recorrido C se realizó el 31 de mayo de 2014, comenzando en Indios Verdes a las 18:23 horas y finalizó a las 19:23 horas (60 minutos de recorrido total).
2. Fueron dos los datos recogidos en este recorrido: tiempo de estancia de cada autobús en una estación (desde que llega hasta que se va) y tiempo de recorrido del autobús entre cada estación de la línea.
3. Los autobuses tomados al momento que se realizó la segunda parte del trabajo de campo fueron articulados con una capacidad aproximada de 160 pasajeros.
4. En la estación de Indios Verdes, se observó que los autobuses llegaban en grupos de tres en un intervalo de ocho minutos, siendo el último autobús el que comenzó a circular casi vacío. A diferencia del recorrido efectuado en la primera parte del trabajo de campo, en aquella ocasión llegaba de uno en uno y no en grupos de tres, lo que denota desorganización y frecuencia poco constante.
5. Al momento de comenzar el tramo “central”, el tiempo de recorrido entre cada estación aumentó un minuto, por la presencia de semáforos, que de haber estado en luz verde, habría disminuido considerablemente dicho tiempo.
6. El tiempo de permanencia del autobús en cada estación osciló entre 47 y 55 segundos, a excepción de algunas estaciones que tienen semáforo adelante o en las puntas,

donde el autobús tuvo que esperar un poco más de tiempo a iniciar un nuevo recorrido.

7. Dada la salida en grupos de tres de la estación de Indios Verdes, durante el recorrido los autobuses iban consecutivamente uno detrás del otro, por lo que el tercer autobús tuvo que esperar más tiempo a que los dos de adelante avanzaran.
8. En cuanto a distancia entre estación y estación en el tramo central, cada una se encuentra a 550 metros aproximadamente de la más próxima, lo cual cambia entre las estaciones que se encuentran en las puntas, donde los trayectos son más largos.
9. A continuación se muestran los resultados obtenidos en el trayecto, los cuales son iguales al trayecto contrario.

**Tabla 3**  
**Datos del recorrido C**

<b>ESTACIONES</b>	<b>TIEMPO EN CADA ESTACION (EN SEGUNDOS)</b>	<b>TIEMPO ENTRE ESTACIONES (EN SEGUNDOS)</b>
Indios Verdes	59	
Deportivo 18 de Marzo	54	180
Euzkaro	52	114
Potrero	52	81
La Raza	54	112
Circuito	49	148
San Simón	54	132
Manuel González	59	121
Buenvista	57	79
El Chopo	55	120
Revolución	54	151
Plaza de la República	53	33
Reforma	52	43
Hamburgo	55	29
Glorieta Insurgentes	55	14
Durango	52	79
Álvaro Obregón	51	72
Sonora	55	60
Campeche	57	14

Chilpancingo	50	42
Nuevo León	49	34
La Piedad	48	65
Poliforum	50	44
Nápoles	56	36
Colonia del Valle	55	55
Ciudad de los Deportes	51	37
Parque Hundido	49	20
Félix Cuevas	49	49
Río Churubusco	52	65
Teatro Insurgentes	49	58
José María Velasco	54	63
Francia	53	51
Olivo (cerrada por remodelación)	-	-
Altavista	51	55
La Bombilla	50	68
Doctor Gálvez	55	52
Ciudad Universitaria	50	39
Centro Cultural Universitario	52	14
Perisur	59	20
Villa Olímpica	51	127
Corregidora	49	141
Ayuntamiento	53	116
Fuentes Brotantes	51	132
Santa Úrsula	50	95
La Joya	52	91
El Caminero	47	147

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos en el recorrido C, el 31 de mayo de 2014.

En las siguientes páginas se muestran unas imágenes realizadas en los recorridos hechos en la Línea 1 del Metrobús:

**Figura 10**  
**Estación del Metrobús Indios Verdes**



Fuente: Elaboración propia, durante el recorrido efectuado el 31 de mayo de 2014.

**Figura 11**

**Andén de la estación del Metrobús Indios Verdes**



Fuente: Elaboración propia, durante el recorrido efectuado el 31 de mayo de 2014.

### **6.3 Justificación del análisis**

La realización del trabajo de campo tuvo como principal objetivo mostrar el funcionamiento de la Línea 1 del Metrobús y las fallas que presenta en su operación, las cuales afectan de manera directa los tiempos de recorrido. Se muestra que las bondades del sistema son víctima de su propio éxito, debido a que la demanda de pasajeros ha sobrepasado la capacidad del servicio que ofrece el Metrobús.

La falta de los corredores viales paralelos a la Avenida de los Insurgentes, las líneas de autobuses que no funcionan correctamente y el abandono del uso del automóvil, han sido causas que han provocado la migración de más de 200,000 pasajeros diarios, que han visto reducido su tiempo de traslado al utilizar el sistema del Metrobús. Así mismo, pese a que la velocidad promedio del Metrobús debería de ser de veinte kilómetros por hora, la realidad es otra, la velocidad del servicio es menor a los quince kilómetros por hora.

Durante las horas pico, el Metrobús ha llegado a dar servicio a 350,000 pasajeros diarios, pese a que haya sido proyectado para 220,000; mientras que algunos autobuses llegan a iniciar su recorrido a la mitad del corredor y no en las terminales de Indios Verdes o El Caminero. Aunado a lo anterior, la incorporación de autobuses biarticulados (que pueden transportar 30% más de pasajeros), no ha representado una solución real al problema del sistema.

Ante las situaciones presentadas anteriormente, la justificación del análisis radica en identificar los problemas existentes en el funcionamiento del Metrobús, con el fin de proponer soluciones para mejorar el servicio y lograr incrementar el tiempo de vida del sistema, ante su posible colapso en los próximos años.

Una buena forma de lograr lo anterior, es llevar a cabo cambios en la infraestructura del sistema, por medio de la instauración de las líneas en las que puede ser dividida la línea 1 y que circulen a lo largo de ella, que permiten mayor flexibilidad de recorrido de los autobuses, que provoque una disminución en los tiempos de recorrido. Así mismo, la construcción e implementación de estaciones de transferencia, y estaciones sin intercambio a lo largo de la Línea 1, provocaría mayor agilidad en el paso de los autobuses, evitando congestión en estaciones con mayor afluencia de pasajeros. Todo esto, emulando la experiencia de transporte en ciudades como Bogotá con el sistema Transmilenio.

Ante el cambio que se ha presentado en los últimos años en la demanda del servicio, el éxito futuro del Metrobús radica en el cambio de la forma en cómo opera el sistema, nuevas y mejores instalaciones, construcción de un segundo carril destinado al sistema BRT,

sistemas que no permitan la saturación en los autobuses y sobre todo la conciencia de mejora en un sistema de transporte que ha revolucionado la movilidad en los habitantes de una de las urbes más grandes y congestionadas del mundo.

#### **6.4 Planteamiento del modelo**

Este modelo está inspirado en el sistema BRT en la Ciudad de México. Concretamente el modelo trata de abordar algunas de las problemáticas de la Línea 1, que es la que atraviesa la Avenida de los Insurgentes.

En ciudades donde el sistema BRT ha resultado ser eficiente y goza de gran popularidad entre los usuarios, como Bogotá (Colombia), donde las líneas también se organizan en corredores correspondientes a grandes avenidas, se ha observado que considerar en cada corredor varias líneas (donde cada una tiene diferentes estaciones o paradas pero no todas las del corredor) puede dar mejor nivel de servicio que considerar sólo una línea (que para en todas las paradas del corredor).

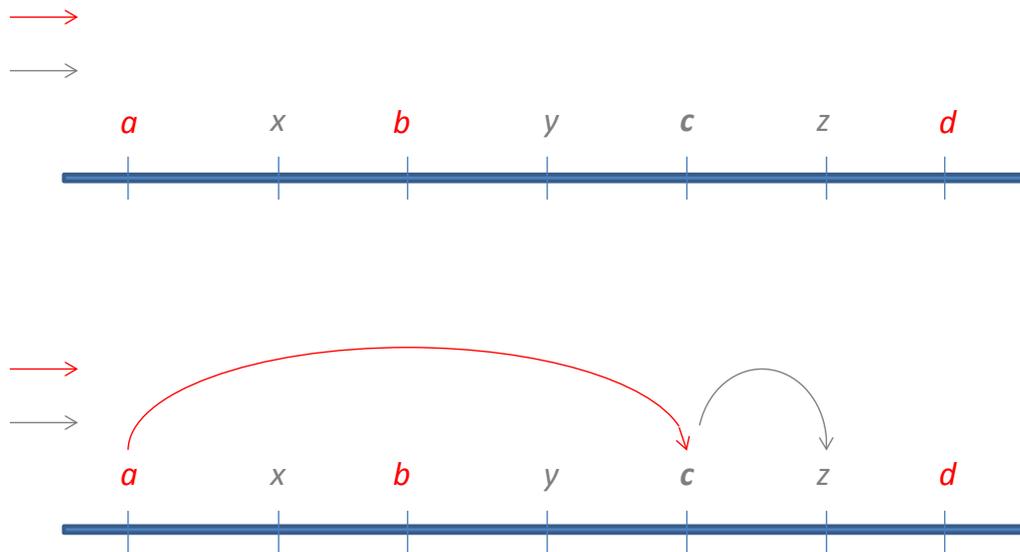
Esto es debido a que estas grandes avenidas son de gran longitud (varios kilómetros) con muchas estaciones. El tiempo que se pierde en para en una de ellas ya es de por si significativo (por el descenso de la velocidad para frenar, bajada y subida de pasajeros y la aceleración). Por tanto el tiempo que se pierde en el conjunto de todas las estaciones de un recorrido puede ser elevado, Y además no sólo afecta al aumento del tiempo de viaje de los usuarios o pasajeros, sino también a los tiempos de espera de los mismos, ya que los vehículos pasaran con menos frecuencia.

Por tanto el considerar en un mismo corredor diferentes líneas que “reparten” las paradas de dicho corredor, con alguna parada estratégica en común, podría agilizar el funcionamiento del sistema.

La siguiente figura muestra un ejemplo de dos líneas la primera (en rojo) para en las estaciones *a*, *b*, *c* y *d*. La segunda (en gris) en las paradas *x*, *y*, *c* y *z*. Ambas tiene una

estación en común, la estación  $c$  (en negrita). Un usuario que desee trasladarse de la estación  $a$  a la estación  $z$  puede tomar un vehículo de la primera línea e ir de la estación  $a$  a la  $c$ , bajar en esa estación y tomar un vehículo de la segunda línea e ir de la estación  $c$  a la  $z$ . Es decir, en este se realiza un trasbordo (o cambio de línea) en la parada  $c$ .

**Figura 12**  
**Líneas del Sistema de Transporte Urbano \***



\* En la parte superior se tiene el ejemplo de dos líneas diferentes, de un mismo corredor, con una parada en común. En la parte inferior se tiene el ejemplo del tránsito en una estación.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo que se plantea consiste en el diseño de las líneas correspondientes a un corredor, así como la asignación de autobuses a esas líneas, con el fin de optimizar el nivel de servicio.

### 6.5 Notaciones y definiciones

Con el fin de formalizar el problema introducimos las siguientes notaciones y definiciones:

-  $n$ : número de estaciones del corredor.

-  $V$ : Conjunto de estaciones. Para simplificar definimos  $V = \{0, 1, \dots, n - 1\}$  y consideramos las estaciones ordenadas según aparecen en el corredor en un sentido prefijado. Es decir, 0 indica la primera estación, 1 la segunda, ..., y  $n - 1$  la última.

**Figura 13**

**Estaciones que componen el corredor**



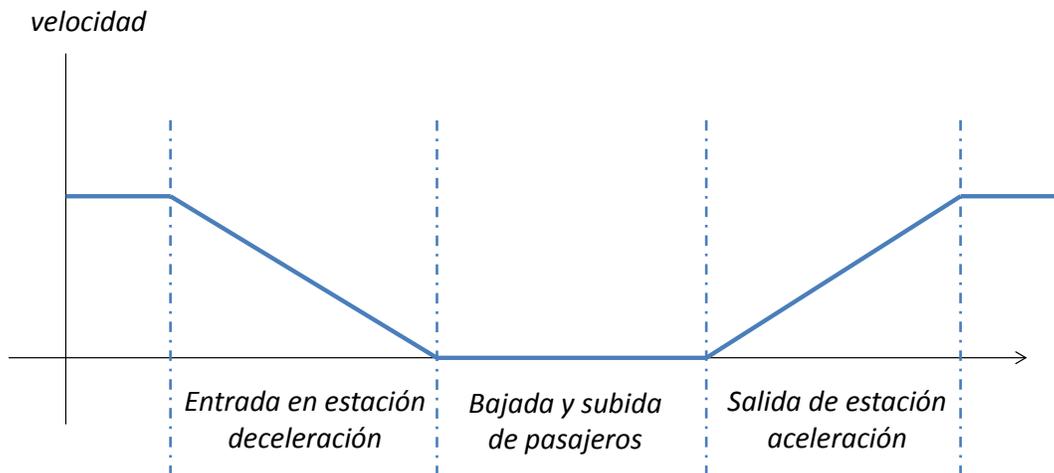
Fuente: Elaboración propia.

-  $t_{ij}$ : tiempo entre las estaciones  $i$  y  $j$ , con  $i, j \in V$ , sin parar, es decir a velocidad normal. Este tiempo es el tiempo medio que hay entre dos estaciones cuando no se para en ninguna de ellas.

-  $t_{par}$ : tiempo que se “pierde” por parar en una estación. Este tiempo incluye el tiempo que se pierde al descender de velocidad para frenar, el tiempo (medio) de bajada y subida de pasajeros y el tiempo hasta alcanzar la velocidad de tránsito normal una vez que se vuelve a arrancar. La figura siguiente ilustra este proceso.

**Figura14**

**Tiempo que se “pierde” al entrar en una estación**



Fuente: Elaboración propia.

-  $dem_{ij}$ : “demanda” entre las estaciones  $i$  y  $j$ , con  $i, j \in V$ . Es decir número de usuarios que quieren ir de la estación  $i$  a la  $j$ .

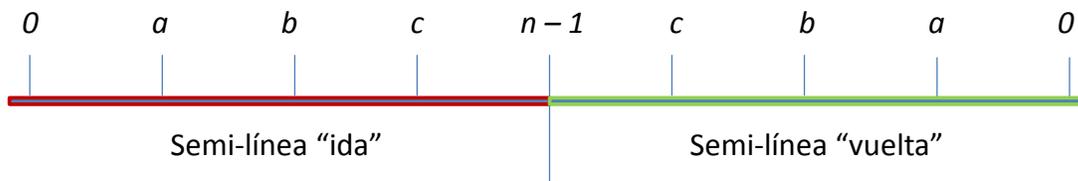
-  $n_{lin}$ : número de líneas.

-  $n_{bus}$ : número de autobuses disponibles.

En el diseño de las líneas hay que hacer las siguientes consideraciones: los autobuses recorren el corredor en ambos sentidos (“ida” y “vuelta”) y por tanto las líneas estarán compuestas por dos semi-líneas, cada una correspondiente a un sentido. Los vehículos de una línea paran en las mismas estaciones en ambos sentidos. Por tanto las dos semi-líneas de una línea están compuestas por las mismas estaciones pero en orden inverso. Además todas las líneas contienen las estaciones 0 y  $n - 1$  (principio y final de corredor). La siguiente figura muestra un ejemplo de una línea (con las estaciones 0,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $n - 1$ ) con las dos semi-líneas correspondientes.

**Figura 15**

**Ejemplo de línea y sus dos semi-líneas correspondientes**



Fuente: Elaboración propia.

Obsérvese que en este ejemplo, acorde con lo anterior, se tiene que  $a < b < c$ . Cuando un autobús llega al final de una semi-línea y ya han bajado los pasajeros en esa estación final (0 o  $n - 1$  según el caso) el conductor maniobra y prepara el vehículo para empezar el trayecto de la siguiente semi-línea. Por tanto se define el siguiente parámetro:

-  $t_{pre}$ : Tiempo de maniobra y preparación del vehículo, una vez que este ha llegado a destino, para comenzar la siguiente semi-línea.

Hay que indicar que en las aplicaciones reales, los valores de los parámetros correspondientes a los tiempos ( $t_{ij}$ ,  $t_{par}$ ,  $t_{pre}$ ) no van a ser valores exactos, sino estimaciones de los valores medios correspondientes y por tanto las variables auxiliares que se definan a partir de estos parámetros también habrá que considerarlos como valores medios. La misma reflexión hay que hacer de  $dem_{ij}$ .

## 6.6 Funciones objetivo

El objetivo del problema es optimizar el nivel de servicio ofrecido a los usuarios. Para medir el nivel de servicio se pueden considerar diferentes funciones objetivos:

- *TTotal*: Tiempo medio empleado por pasajero en ir desde la estación de partida, a su estación de destino. En este tiempo se incluyen el tiempo de espera del vehículo en la estación de origen, los tiempos de viaje en los vehículos y los tiempos de espera en las estaciones donde se realizan los trasbordos.

- *TEspera*: Tiempo medio de espera por pasajero en el recorrido de desde la estación de partida, a su estación de destino. Como se acaba de ver este tiempo de espera incluye los tiempos de espera en la estación de origen y las de trasbordos. Este tiempo *TEspera* es una componente de *TTotal*. Sin embargo el considerarlo por separado se debe a que normalmente la percepción por parte de los usuarios de los tiempos de espera es más negativa que los tiempos de viaje.

- *NTransit*: Número medio de tránsitos realizados por pasajero en su recorrido. Como se ha comentado inicialmente los trasbordos pueden agilizar y reducir los tiempos totales del recorrido, sin embargo un número excesivo de trasbordos tampoco es bien percibido.

En principio, vamos a considerar minimizar la primera función objetivo, *TTotal*. Es decir, minimizar el tiempo total empleado por pasajero, para ir desde su origen a su destino con el uso del servicio. No obstante los otros dos objetivos también se pueden considerar junto con *TTotal* y enfocar el problema desde un punto de vista multiobjetivo.

Además, como se verá más adelante se van a diseñar métodos para calcular estos objetivos, por separado, desde cada solución.

## 6.7 Representación de las soluciones y cálculo de los objetivos correspondientes

Como se ha comentado anteriormente, el problema consiste en el diseño de líneas y en la asignación de los autobuses a cada línea. Por lo tanto, cada solución va a estar definida por las  $nlin$  líneas. Es decir, por las estaciones que componen cada una de ellas y por el número de autobuses asignados a cada línea.

Más formalmente, una solución se puede representar por el par  $(ST, AL)$ . Donde  $ST$  es el conjunto de líneas (*SeT of lines*) y  $AT$  es un vector con el número autobuses asignados a cada línea. Es decir,

$$ST = \{ L_0, L_1, \dots, L_{nlin-1} \} \quad y$$

$$AT = ( X_0, X_1, \dots, X_{nlin-1} )$$

donde  $L_s$  representa a la línea  $s^{th}$  y  $X_s$  es el número de autobuses asignados a esa línea. A su vez a cada línea  $L_s$  la podemos definir de la forma:

$$L_s = 0 - a - b - c - d - n - 1 \quad \text{o bien} \quad L_s = \{ 0, a, b, c, d, n - 1 \}$$

o bien  $L_s(0) = 0, L_s(1) = a, L_s(2) = b, L_s(3) = c, L_s(4) = d$  y  $L_s(5) = n - 1$ ,

donde  $0, a, b, c, d$  y  $n - 1$  son las estaciones que la componen.

Obsérvese, según lo comentado anteriormente, que las estaciones que componen una línea están ordenadas en las mismas en orden lexicográfico. Es decir, en el ejemplo anterior,  $0 < a < b < c < d < n - 1$ .

En cuanto al parámetro  $nlin$  en realidad es el valor máximo del número de líneas deseables. Si en la solución obtenida hay líneas iguales. Es decir, con las mismas estaciones, entonces se pueden unir (sumando los respectivos autobuses asignados), con lo que el número de líneas reales sería menor que  $nlin$ . Lo mismo ocurriría si en alguna solución existen líneas que no tienen autobuses asignados.

Vamos a denotar por  $Sl_{2s}$  y  $Sl_{2s+1}$  a cada una de las dos semi-líneas que componen la línea  $L_s$ . Así en el caso anterior  $Sl_{2s} = 0 - a - b - c - d - n - 1$  y  $Sl_{2s+1} = n - 1 - d - c - b - a - 0$ . De esta forma se tiene el conjunto de semi-líneas  $Sl_0, Sl_1, Sl_2, Sl_3, \dots, Sl_{2 \cdot nlin - 2}$  y  $Sl_{2 \cdot nlin - 1}$  (las dos primeras corresponden a  $L_0$ , las dos siguientes a  $L_1, \dots$ , las dos últimas a  $L_{nlin}$ ).

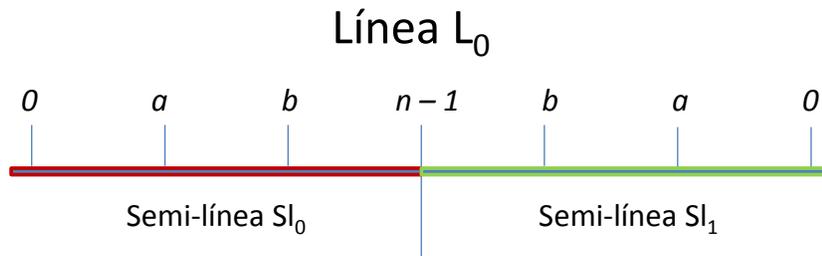
Para el cálculo de los diferentes objetivos correspondientes a una solución, se va a definir un grafo auxiliar  $GR = (V, ARC)$  asociado a dicha solución. Por lo tanto, en este grafo el conjunto de nodos coincide o se identifica con el conjunto de estaciones del problema  $V$  ( $V = 0, 1, \dots, n - 1$ ). Por otra parte, los arcos del grafo se definen por las ternas de la forma  $(p, q, h)$ , donde  $p, q \in V, p \neq q$  y  $h \in \{ 0, 1, \dots, 2 \cdot n - 1 \}$ . Es decir, los valores de  $h$  son los índices de las semi-líneas. Además, se debe verificar que las estaciones  $p$  y  $q$  están en la semi-línea  $Sl_h$  y la estación  $p$  sea anterior a la estación  $q$  en dicha semi-línea. En otras palabras: que se pueda ir de la estación  $p$  a la estación  $q$  usando la semi-línea  $Sl_h$ . Por lo tanto, el conjunto de arcos se puede definir como:

$$ARC = \{ \text{arc} = (p, q, h): p, q \in V, p \neq q, p \text{ y } q \text{ son visitadas en } Sl_h \text{ y } p \text{ es visitada antes que } q \}$$

El nodo inicial y final de cada arco  $(p, q, h)$  en  $GR$  son precisamente  $p$  y  $q$ . Para ilustrar cómo se define el grafo  $GR$  de una solución consideremos un ejemplo sencillo: una solución con una sola línea con las estaciones  $0, a, b$  y  $n - 1$ . Por lo tanto, esta línea ( $L_0$ ) estará compuesta por dos semi-líneas ( $Sl_0$  y  $Sl_1$ ) según se indica en la figura 16.

**Figura 16**

**Solución con una sola línea ( $L_0$ ) con las estaciones 0, a, b y  $n - 1$**



Fuente: Elaboración propia.

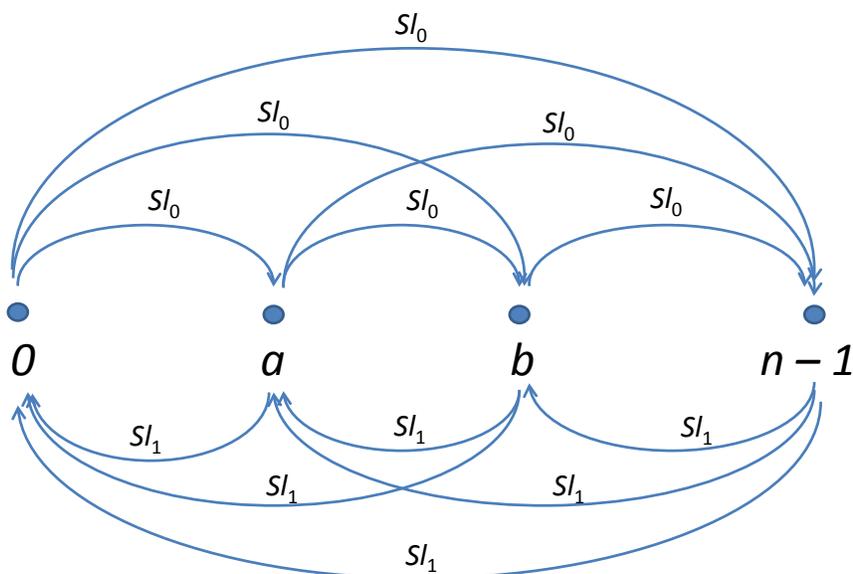
Esta solución tendrá el siguiente conjunto de arcos:

$$ARC = \{(0, a, 0), (0, b, 0), (0, n - 1, 0), (a, b, 0), (a, n - 1, 0), (b, n - 1, 0), (n - 1, b, 1), (n - 1, b, 1), (n - 1, a, 1), (n - 1, 0, 1), (b, a, 1), (b, 0, 1), (a, 0, 1)\}$$

A continuación se muestra, en la figura 17, el grafo con este conjunto de arcos:

**Figura 17**

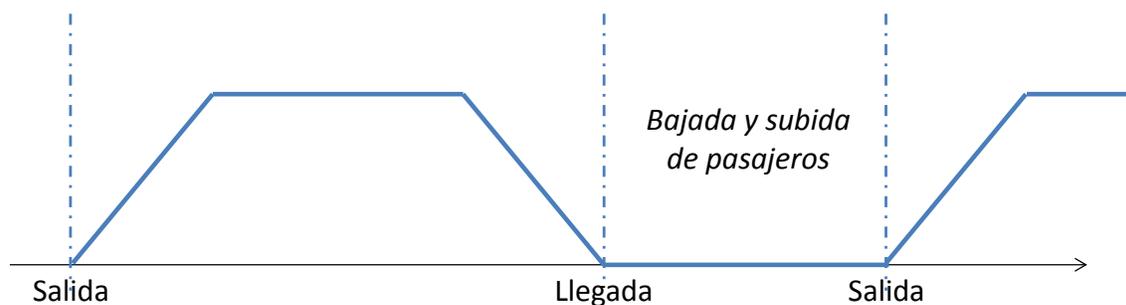
**Grafo  $GR$  correspondiente a la solución de la figura anterior**



Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, cada arco  $(p, q, h) \in ARC$  va a tener asignado un coste  $cst_{pqh}$  que se obtiene como suma de dos componentes  $cst^1_{pqh}$  y  $cst^2_{pqh}$ . Es decir,  $cst_{pqh} = cst^1_{pqh} + cst^2_{pqh}$ . El primer componente  $cst^1_{pqh}$  se define como el tiempo del trayecto desde la estación  $p$  a la  $q$  en la semi-línea  $Sl_h$ . Es decir, teniendo en cuenta los tiempos perdidos, por las paradas en cada una de las estaciones (según se comentó al definir el parámetro  $tpar$ ). En el caso del ejemplo anterior se tiene que  $cst^1_{0a0} = t_{0a} + tpar$ ,  $cst^1_{0b0} = t_{0b} + 2 \cdot tpar$ ,  $cst^1_{0n-10} = t_{0n-1} + 3 \cdot tpar$  y así sucesivamente. Es decir,  $cst^1_{pqh}$  es  $t_{pq} + tpar$  más el número de estaciones que hay desde la estación  $p$  hasta la  $q$  (incluyendo esta última) en la semi-línea  $Sl_h$ . A este respecto creemos conveniente hacer la siguiente reflexión: quizás en este cálculo de  $cst^1_{pqh}$  se podría ser más preciso dependiendo del sistema de subida y bajada de pasajeros en los vehículos. En nuestro caso se está suponiendo que los pasajeros pueden subir al vehículo durante todo el tiempo que permanece el vehículo parado en la estación. Y que sin embargo emplean ese tiempo en descender del vehículo, una vez que éste para en la estación correspondiente. Es decir, quizás estemos haciendo una estimación excesiva del tiempo de descenso del vehículo, por parte de los pasajeros. Sin embargo, este exceso de tiempo puede compensar otros tiempos, como por ejemplo el traslado de una dársena, a otra dentro de la misma estación en caso de trasbordos. La figura 18 ilustra esta reflexión:

**Figura 18**  
**Tiempo de viaje entre dos estaciones \***



\* Se considera que el tiempo de trayecto de un pasajero empieza en la salida del vehículo y finaliza cuando ha descendido de él.

Fuente: Elaboración propia.

El segundo componente  $cst_{pqh}^2$  se define como el tiempo (medio) de espera hasta que pase un vehículo de la línea, este tiempo se calcula como:

$$cst_{pqh}^2 = \frac{\text{Tiempo total del recorrido de la línea donde se incluye la semi-línea } Sl_h}{2 \cdot \text{n}^\circ \text{ de autobuses asignados a esa línea}}$$

Para ilustrar esta forma de calcular considérese el siguiente ejemplo: supóngase una línea cuyo tiempo total de recorrido sean sesenta minutos. Si esa línea tiene asignado un vehículo, el intervalo (medio) entre llegadas consecutivas de ese vehículo, en una determinada estación de esa línea y en una determinada semi-línea (es decir, en un determinado sentido) serán sesenta minutos; si tienen asignados dos vehículos, el intervalo entre las salidas consecutivas de los vehículos será de treinta minutos; y así sucesivamente. Por otra parte, al margen de cuestiones de sincronización que no se consideran en este modelo, se puede suponer que las llegadas de los usuarios, a esa estación, para tomar un vehículo de esa línea, en esa dirección se distribuyen de forma uniforme, en ese intervalo entre salidas consecutivas de vehículos. Es decir, unos llegarán justo después de la salida del vehículo anterior, con lo cual su tiempo de espera del siguiente vehículo será casi la longitud de ese intervalo; otros llegarán justo antes de la salida del siguiente vehículo, con lo cual apenas tendrán que esperar y otros llegarán a mitad del intervalo. Por lo tanto, el tiempo medio de espera será la mitad de la longitud de ese intervalo entre salidas consecutivas.

Una vez definido y obtenido el grafo auxiliar  $GR = (V, ARC)$  para cada par de estaciones  $i, j \in V$  se obtiene el camino (de coste) mínimo entre dichos puntos (considerando los costes  $cst$ ). El coste asociado a este camino mínimo es el tiempo total del recorrido entre estas estaciones, incluyendo los tiempos de viajes y los tiempos de espera en las diferentes estaciones (inicial y trasbordos). Denotaremos por  $ttot(i, j)$  este tiempo total de viaje, por  $tesp(i, j)$  el tiempo de espera en este trayecto,  $tvia(i, j)$  el tiempo de trayecto en los vehículos y por  $ntra(i, j)$  el número de trasbordos o intercambios que se realizan. Obviamente el valor de  $ttot(i, j)$  se obtiene como la suma de los valores de  $cst$  correspondientes a los arcos del camino mínimo obtenido. De igual forma  $tesp(i, j)$  y  $tvia(i,$

$j$ ) se obtienen respectivamente como la suma de los valores de  $cst^2$  y  $cst^1$  de estos arcos. Finalmente  $ntra(i, j)$  es el número de arcos menos uno.

Una vez hallados los valores de  $ttot$ ,  $tvia$ ,  $tesp$  y  $ntra \forall i, j \in V$   $i \neq j$ , los valores de los distintos objetivos definidos anteriormente se pueden calcular fácilmente, así por ejemplo:

$$TTotal = \frac{(\sum_{i,j \in V} dem_{ij} \cdot Ttot(i, j))}{(\sum_{i,j \in V} dem_{ij})}$$

y de forma análoga se calculan  $TEspera$  y  $NTransit$  si fuera necesario.

Por lo tanto, cuando se obtiene una solución  $S = (ST, AL)$ , durante o tras un procedimiento constructivo, o tras un movimiento vecinal (como los que se propondrán más adelante) los pasos a seguir para hallar los valores de las funciones objetivos correspondientes son los siguientes:

- Para cada línea  $L_s$  determinar el tiempo de recorrido de esa línea, teniendo en cuenta los tiempos de viaje, los tiempos de parada en cada estación y el tiempo de preparación antes de comenzar cada semi-línea. Denotemos por  $tlin(s)$  este tiempo de recorrido de la línea  $L_s$ .
- También para cada línea  $L_s$  hallar los tiempos de viaje entre cada par de paradas de esa línea teniendo en cuenta los tiempos de viaje y los tiempos de parada en cada estación. Es decir, en cada caso hay que determinar los tiempos de recorrido por cada una de las semi-líneas. Para facilitar los cálculos y las descripciones posteriores las semi-línea que definimos como “ida” (de la estación 0 a la  $n - 1$ ) es la semi-línea de índice par. Es decir,  $Sl_{2,s}$ ; mientras que la semi-línea de “vuelta” (de la estación  $n - 1$  a 0) es  $Sl_{2,s+1}$ . Así, sean dos estaciones  $p$  y  $q$  de la línea  $L_s$  donde  $p < q$  se ha de calcular el tiempo entre las estaciones  $p$  y  $q$  por la semi-línea  $Sl_{2,s}$  que denotaremos  $tsl(p, q, 2 \cdot s)$  y de igual forma el tiempo entre las estaciones  $q$  y  $p$  por la semi-línea  $Sl_{2,s+1}$   $tsl(q, p, 2 \cdot s + 1)$ . Obviamente se

tiene que  $tsl(p, q, 2 \cdot s) = tsl(q, p, 2 \cdot s + 1)$  y estos valores se calculan como el valor de  $cst_{pq2 \cdot s}^t$  según se ha explicado anteriormente.

- Construir el grafo asociado auxiliar  $GR = (V, ARC)$ , según se ha explicado anteriormente. Obsérvese que los valores de  $cst^t$  y  $cst^2$  se calculan fácilmente a partir de los valores de  $tlin$  y  $tsl$ .
- Hallar los caminos de mínimo coste entre cada par de estaciones  $i$  y  $j$  en ese grafo con los correspondientes costes (tiempos)  $ttot(i, j)$  (y en su caso  $tesp(i, j)$  y  $ntra(i, j)$ ). Sobre la resolución del problema del camino mínimo se hablara en el apéndice 6.17.
- Determinar la funciones o funciones objetivos correspondientes a la solución.

## 6.8 Procedimientos de solución: procedimientos constructivos

Para construir soluciones se diseñan diferentes métodos. En primer lugar se van a diseñar un método constructivo en cuatro fases que se ejecutan consecutivamente (A, B, C y D). Las dos primeras tienen como objeto el diseño de las diferentes líneas y las dos últimas, la asignación de autobuses disponibles.

En la fase A se asigna una estación diferente (que denominaremos estación-“semilla”) a cada una de las  $nlin$  líneas. Para ello se definen previamente los siguientes valores y variables auxiliares:

$$- demtot(i) = \sum_{\substack{j \neq i \\ j \in V}} (dem(i, j) + dem(j, i)), \forall i \in V$$

es decir, la suma de los pasajeros que salen de la estación  $i$  o que llegan a ella.

- *Sel*: conjunto de estaciones que han sido asignadas a alguna estación; este conjunto se inicializa al comienzo de la fase, y se utiliza en las fases A y B de forma continua. Por lo

tanto, la composición de *Sel* al comienzo de la fase B es la misma con que ha finalizado la fase A.

$$- dem1(i) = \sum_{j \in Sel} (dem(i, j) + dem(j, i)), \forall i \in V \setminus Sel,$$

es decir, la suma de los viajeros que viajan, en ambos sentidos, entre la estación *i* y cada una de las estaciones ya seleccionadas como semillas en cada momento.

El algoritmo constructivo actúa iterativamente. En cada iteración selecciona una estación semilla y la asigna consecutivamente a cada una de las líneas (línea 0, 1, 2, ...) hasta tener los *n<sub>sel</sub>* estaciones semillas. Para ello en cada iteración se tiene en cuenta los siguientes criterios:

- Para la selección de la estación-semilla se tiene en cuenta una función guía que tiene en cuenta dos componentes. El primer componente es el valor de la variable *dem1(i)*, de forma que se favorece la elección de la estación que menor valor tiene. La idea es intentar elegir estaciones-semilla que tengan poca demanda de pasajero entre ellas ya que pertenecen a diferentes líneas.
- El segundo componente es el número de veces (frecuencia) con que cada estación ha sido elegida en ejecuciones anteriores de esta fase. Estas frecuencias son valores de entrada de esta fase y se denotan por *freq(i)*. Se favorece la elección de estaciones con menor valor de *freq(i)*, para favorecer la generación de soluciones diversas.
- El peso de cada componente en la función guía resultante viene regulado por el parámetro  $\beta \in [0,1]$ .
- Por otra parte, también con el objeto de favorecer la diversidad, no necesariamente se elige la estación con menor valor de la función guía. Siguiendo la filosofía de las estrategias de GRASP (poner referencias) se crea una lista (lista de candidatos) con las estaciones con menor valor de la función guía y se elige una al azar de esta lista. El

tamaño de la lista, y por tanto el grado de aleatoriedad de la elección viene regulado por el parámetro  $\alpha \in [0,1]$ , de forma que el valor de  $\alpha = 0$  se corresponde con elecciones totalmente aleatorias y  $\alpha = 1$  se corresponde con elecciones determinísticas.

Con estas precisiones, la fase A puede ser descrita en pseudocódigo como sigue:

### Pseudocódigo 1.- Constructivo - Fase A

---

Procedimiento **Fase A**( $\alpha, \beta, frq$ )

1. Hacer  $Sel = \{0, n - 1\}$
2. Hacer  $L_0 = 0 - 1 - n - 1$  y  $Sel = Sel \cup \{1\}$
3.  $\forall i \in V \setminus Sel$ : hacer  $dem1(i) = dem(i, 1) + dem(1, i)$

**Desde**  $s := 1$  to  $nlin-1$  hacer

**Inicio**

4. Calcular:

$$mindem = \min \{ dem1(i) : \forall i \in V \setminus Sel \},$$

$$maxdem = \max \{ dem1(i) : \forall i \in V \setminus Sel \}$$

$$minfrq = \min \{ frq(i) : \forall i \in V \setminus Sel \}, maxfrq = \max \{ frq(i) : \forall i \in V \setminus Sel \}$$

$\forall i \in V \setminus Sel$ :

**Inicio**

5. Si  $mindem = maxdem$  hacer  $CompA = 0$ ,

$$\text{en caso contrario hacer } CompA = \left( \frac{dem1(i) - mindem}{maxdem - mindem} \right)$$

6. Si  $minfrq = maxfrq$  hacer  $CompB = 0$ ,

$$\text{en caso contrario hacer } CompB = \left( \frac{frq(i) - minfrq}{maxfrq - minfrq} \right)$$

7. Hacer:  $fg(i) = \beta \cdot CompA + (1 - \beta) \cdot CompB$

**Fin**

8. Calcular  $minfg = \min \{ fg(i) : \forall i \in V \setminus Sel \}$  y  $maxfg = \max \{ fg(i) : \forall i \in V \setminus Sel \}$

9. Hacer  $LC = \{i \in V \setminus Sel : fg(i) \leq \alpha \cdot minfg + (1 - \alpha) \cdot maxfg\}$

10. Elegir  $i^* \in LC$  aleatoriamente

11. Hacer  $L_s = 0 - i^* - n - 1$  y  $Sel = Sel \cup \{i^*\}$

12.  $\forall i \in V \setminus Sel$ : hacer  $dem1(i) = dem(i, i^*) + dem(i^*, i)$

**Fin**

---

En la fase B se insertan el resto de estaciones, sin seleccionar, a alguna de las  $nlin$  líneas.

Para describir esta fase B se tiene en cuenta los siguientes puntos:

- Con el fin de que el número de estaciones por línea este más o menos equilibrado, se establece un número máximo de estaciones por línea (además de 0 y  $n - 1$ ) que se calcula como  $maxest = \left\lfloor \frac{n-2}{nlin} \right\rfloor$ .
- El proceso es iterativo. En cada iteración se selecciona una estación no seleccionada previamente y se inserta en una línea hasta que todas las estaciones estén insertadas. Al comienzo de cada iteración se determina a que línea se asignaría cada estación en caso de ser seleccionada. La idea es asignar cada estación  $i$  a la línea con más demanda de pasajeros (en ambos sentidos) entre la estación  $i$  y cada una de las estaciones de esa línea con relación a las estaciones que tiene esa línea. Para ello para cada estación  $i \in V \setminus Sel$  y cada línea  $s$ ,  $s = 0, \dots, n-1$  se calcula:

$$dem2(i, s) = \sum_{j \in L_s} (dem(i, j) + dem(j, i))$$

de forma que la línea donde se insertará la estación  $i$  en caso de ser seleccionada (y que se denota por  $k1(i)$ ) se calcula como:

$$k1(i) = argmax \left\{ \frac{dem2(i, s)}{|L_s|} : s = 0, \dots, n - 1 \right\}.$$

- Para evitar la asignación de estaciones a líneas que ya han alcanzado su número máximo de estaciones ( $maxest$ ) se define  $dem2(i, s) = 0$  si  $|L_s| = maxest$ .
- Para la selección de la estación-semilla se tiene en cuenta una función guía que tiene en cuenta dos componentes. El primer componente es el “coste marginal” de no asignar a cada estación su mejor línea según el cociente definido en el párrafo anterior, sino a la segunda mejor línea. Para ello para cada estación  $i$  se calcula:

$$k2(i) = argmax \left\{ \frac{dem2(i, s)}{|L_s|} : s = 0, \dots, n - 1, s \neq k1(i) \right\},$$

de forma que la primera componente de la función guía se calcula como:

$$\Delta(i) = \frac{dem2(i,k1(i))}{|L_{k1(i)}|} - \frac{dem2(i,k2(i))}{|L_{k2(i)}|}.$$

- El segundo componente es el número de veces (frecuencia) que cada estación ha sido asignada en ejecuciones anteriores a cada línea. Estas frecuencias son valores de entrada de esta fase y se denotan por  $freq(i, s)$ . En cada iteración se favorece la selección de estaciones  $i$  que hayan sido asignadas pocas veces a su correspondiente línea a  $k1(s)$ . De esta forma se intenta producir soluciones diversas.
- Al igual que en la fase anterior el peso de cada componente en la función guía resultante viene regulado por el parámetro  $\beta \in [0,1]$ . Así mismo, con el objeto de favorecer la diversidad, no necesariamente se elige la estación con menor valor de la función guía. En su lugar se crea una lista (lista de candidatos) con las estaciones con menor valor de la función guía y se elige una al azar de esta lista. Como en el caso anterior, el tamaño de la lista y por lo tanto, el grado de aleatoriedad de la elección viene regulado por el parámetro  $\alpha \in [0,1]$  (máxima aleatoriedad con  $\alpha = 0$  y elecciones determinísticas con  $\alpha = 1$ ).
- El conjunto  $Sel$  y el conjunto de  $L_s$  no se inicializa al comienzo de esta fase, sino que se usa el valor obtenido al finalizar la Fase A.

Con estas precisiones, la fase B puede ser descrita en pseudocódigo como sigue:

### **Pseudocódigo 2.- Constructivo - Fase B**

---

Procedimiento **Fase B**( $\alpha, \beta, freq$ )

1.  $\forall i \in V \setminus Sel, \forall s = 0, \dots, nlin - 1$ : hacer  $dem2(i, s) = dem(i, L_s(1)) + dem(L_s(1), i)$

**Mientras**  $|Sel| < n$  hacer:

**Inicio**

2.  $\forall i \in V \setminus Sel$  determinar:

$$k1(i) = argmax \left\{ \frac{dem2(i,s)}{|L_s|} : s = 0, \dots, n - 1 \right\}$$

$$k2(i) = \operatorname{argmax} \left\{ \frac{\operatorname{dem}2(i,s)}{|L_s|} : s = 0, \dots, n-1, s \neq k1(i) \right\}$$

$$\Delta(i) = \frac{\operatorname{dem}2(i,k1(i))}{|L_{k1(i)}|} - \frac{\operatorname{dem}2(i,k2(i))}{|L_{k2(i)}|}.$$

3. Calcular:

$$\min\Delta = \min \{ \Delta(i) : \forall i \in V \setminus Sel \}, \max\Delta = \max \{ \Delta(i) : \forall i \in V \setminus Sel \}$$

$$\min\operatorname{freq} = \min \{ \operatorname{freq}(i, k1(i)) : \forall i \in V \setminus Sel \},$$

$$\max\operatorname{freq} = \max \{ \operatorname{freq}(i, k1(i)) : \forall i \in V \setminus Sel \}$$

$\forall i \in V \setminus Sel$ :

**Inicio**

4. Si  $\min\Delta = \max\Delta$  hacer  $\operatorname{Comp}A = 0$ ,

$$\text{en caso contrario hacer } \operatorname{Comp}A = \left( \frac{\Delta(i) - \min\Delta}{\max\Delta - \min\Delta} \right)$$

5. Si  $\min\operatorname{freq} = \max\operatorname{freq}$  hacer  $\operatorname{Comp}B = 0$ ,

$$\text{en caso contrario hacer } \operatorname{Comp}B = \left( \frac{\max\operatorname{freq} - \operatorname{freq}(i, k1(i))}{\max\operatorname{freq} - \min\operatorname{freq}} \right)$$

6. Hacer:  $fg(i) = \beta \cdot \operatorname{Comp}A + (1 - \beta) \cdot \operatorname{Comp}B$

**Fin**

7. Calcular  $\min fg = \min \{ fg(i) : \forall i \in V \setminus Sel \}$  y  $\max fg = \max \{ fg(i) : \forall i \in V \setminus Sel \}$

8. Hacer  $LC = \{ i \in V \setminus Sel : fg(i) \geq \alpha \cdot \min fg + (1 - \alpha) \cdot \max fg \}$

9. Elegir  $i^* \in LC$  aleatoriamente

10. Hacer  $L_{k1(i^*)} = L_{k1(i^*)} \cup \{i^*\}$  y  $Sel = Sel \cup \{i^*\}$

11.  $\forall i \in V \setminus Sel$ :

si  $|L_{k1(i^*)}| < \max\operatorname{est}$  hacer

$$\operatorname{dem}2(i, k1(i^*)) = \operatorname{dem}2(i, k1(i^*)) + \operatorname{dem}(i^*, i) + \operatorname{dem}(i, i^*)$$

en caso contrario hacer  $\operatorname{dem}2(i, k1(i^*)) = 0$

**Fin**

Una vez que todas las estaciones han sido asignadas a alguna línea, en las fases C y D se asignan los autobuses a estas líneas. La fase C tiene como objeto asegurar que todas las estaciones estén cubiertas por algún autobús. Es decir, que para cada parada haya al menos un autobús que paré en ella; y que al menos esté asignado un autobús a alguna de las líneas a las que esté asignada esta parada. Obsérvese que todas las estaciones estén cubiertas es condición necesaria y suficiente para que todas los nodos del grafo  $GR$ , asociado a la solución, estén conectados; y, por lo tanto, la solución sea factible. Esto es porque en este modelo todas las líneas tienen, al menos, dos estaciones en común: 0 y  $n - 1$ . Para describir esta fase C se tiene en cuenta los siguientes puntos:

- Se van a definir dos vectores de variables auxiliares: *cubierto(i)* es una variable booleana que indica si la estación  $i, \forall i \in V$  está cubierta, y *noCubLin(s)* que indica el número de estaciones no cubiertas de la línea  $s, s = 0, \dots, nlin-1$ . Así mismo, se definen la variables  $ncub$  = número de estaciones no cubiertas, y  $nbusasig$  = número de autobuses asignados.
- El proceso es iterativo. En cada iteración se selecciona una línea y se le asigna un autobús. El proceso finaliza cuando todas las paradas están cubiertas.
- Para la elección de la línea a la que se va a añadir un autobús, se hace uso de una función guía con dos componentes. El primer componente es el número de estaciones no cubiertas que tiene cada la línea (*noCubLin(s)*).
- El segundo componente es el número de veces (frecuencia) que a cada línea se le ha sido un autobús en ejecuciones anteriores de esta fase. Estas frecuencias son valores de entrada de esta fase y se denotan por *frq(s)*. Se favorece la elección de líneas con menor valor de *frq(s)* para favorecer la generación de soluciones diversas.
- Al igual que en las fases anteriores, el peso de cada componente, en la función guía resultante, viene regulado por el parámetro  $\beta \in [0,1]$ . Así mismo, con el objeto de favorecer la diversidad, no necesariamente se elige la estación con menor valor de la función guía. En su lugar se crea una lista (lista de candidatos) con las estaciones con menor valor de la función guía y se elige una al azar de esta lista. Como en el caso anterior el tamaño de la lista; y, por lo tanto, el grado de aleatoriedad de la elección viene regulado por el parámetro  $\alpha \in [0,1]$  como en las fases anteriores.

De esta forma la fase C se describe en pseudocódigo como sigue:

### Seudocódigo 3.- Constructivo - Fase C

---

Procedimiento **Fase C**( $\alpha, \beta, frq$ )

1. Hacer:  $ncub = n, nbusasig = 0$   
 $cubierto(i) = FALSE, \forall i \in V,$   
 $noCubLin(s) = |L_s|, \forall s = 0, \dots, nlin - 1,$   
 $AL(s) = 0, \forall s = 0, \dots, nlin - 1$

**Mientras**  $ncub > 0$  hacer:

**Inicio**

2. Definir  $J = \{ s \in \{0, \dots, nlin - 1\} : AL(s) = 0 \}$

2. Calcular:

$$minNcub = \min \{ noCubLin(s) : s \in J \}$$

$$maxNcub = \max \{ noCubLin(s) : s \in J \}$$

$$minfrq = \min \{ frq(s) : s \in J \}$$

$$maxfrq = \max \{ frq(s) : s \in J \}$$

$\forall s \in J :$

**Inicio**

3. Si  $minNcub = maxNcub$  hacer  $CompA = 0,$

en caso contrario hacer  $CompA = \left( \frac{noCubLin(s) - minNcub}{maxNcub - minNcub} \right)$

4. Si  $minfrq = maxfrq$  hacer  $CompB = 0,$

en caso contrario hacer  $CompB = \left( \frac{maxfrq - frq(s)}{maxfrq - minfrq} \right)$

5. Hacer:  $fg(s) = \beta \cdot CompA + (1 - \beta) \cdot CompB$

**Fin**

6. Calcular:  $minfg = \min \{ fg(s) : s \in J \}$  y

$$maxfg = \max \{ fg(s) : s \in J \}$$

7. Hacer  $LC = \{ s \in J : fg(s) \geq \alpha \cdot minfg + (1 - \alpha) \cdot maxfg \}$

8. Elegir  $s^* \in LC$  aleatoriamente

9. Hacer:  $AL(s^*) = AL(s^*) + 1$  y  $nbusasig = nbusasig + 1$

10. Hacer:  $cubierto(i) = TRUE, \forall i \in V,$

- 11 Actualizar  $noCubLin(s) \forall s = 0, \dots, nlin - 1$  y  $ncub$

**Fin**

---

Finalmente, en la fase D se asignan el resto de los autobuses disponibles. Para describir esta fase D, se tiene en cuenta los siguientes puntos:

- Este es un proceso iterativo en el que en cada iteración se elige una línea y se le asigna un autobús. Usa como variable auxiliar  $nbusasig$  que tomo como valor inicial el

obtenido al finalizar la fase C. El proceso finaliza cuando todos los autobuses están asignados ( $nbusasig = nbus$ ).

- Se va a hacer uso de la variable auxiliar  $demL(s) = \sum_{\substack{i,j \in L_s \\ i \neq j}} (dem_{ij} + dem_{ji})$  que indica, por lo tanto, la cantidad de pasajeros que se trasladan entre todas las paradas de la línea  $s$ .
- Para la elección de la línea a la que se va a añadir un autobús, se hace uso de una función guía con dos componentes. El primer componente es el ratio entre la demanda total de pasajeros entre estaciones de esa línea entre el número de autobuses más uno.

$$\left( \frac{demL(s)}{AL(s) + 1} \right)$$

- El segundo componente es la suma (frecuencia) de los autobuses que han sido asignados a cada línea en ejecuciones anteriores de esta fase. Estas frecuencias son valores de entrada de esta fase y se denotan por  $frq(s)$ . Se favorece la elección de líneas con menor valor de  $frq(s)$  para favorecer la generación de soluciones diversas.
- Al igual que en fase anteriores el peso de cada componente en la función guía resultante viene regulado por el parámetro  $\beta \in [0,1]$ . Así mismo, con el objeto de favorecer la diversidad, no necesariamente se elige la estación con menor valor de la función guía. En su lugar se crea una lista (lista de candidatos) con las estaciones con menor valor de la función guía y se elige una al azar de esta lista. Como en el caso anterior el tamaño de la lista; y, por lo tanto, el grado de aleatoriedad de la elección viene regulado por el parámetro  $\alpha \in [0,1]$  como en fases anteriores.

De esta forma la fase D se describe en pseudocódigo como sigue:

## Seudocódigo 4.- Constructivo - Fase D

---

Procedimiento **Fase D**( $\alpha, \beta, frq$ )

**Mientras**  $nbusasig < nbus$  hacer:

**Inicio**

1. Calcular  $Ratio(s) = \frac{demL(s)}{AL(s)+1}, \forall s = 0, \dots, nlin - 1$

2. Calcular:

$minRatio = \min \{ Ratio(s) : \forall s = 0, \dots, nlin - 1 \},$

$maxRatio = \max \{ Ratio(s) : \forall s = 0, \dots, nlin - 1 \}$

$minfrq = \min \{ frq(s) : \forall s = 0, \dots, nlin - 1 \},$

$maxfrq = \max \{ frq(s) : \forall s = 0, \dots, nlin - 1 \}$

$\forall s = 0, \dots, nlin - 1:$

**Inicio**

3. Si  $minRatio = maxRatio$  hacer  $CompA = 0,$

en caso contrario hacer  $CompA = \left( \frac{Ratio(s) - minRatio}{maxRatio - minRatio} \right)$

4. Si  $minfrq = maxfrq$  hacer  $CompB = 0,$

en caso contrario hacer  $CompB = \left( \frac{maxfrq - frq(i)}{maxfrq - minfrq} \right)$

5. Hacer:  $fg(i) = \beta \cdot CompA + (1 - \beta) \cdot CompB$

**Fin**

6. Calcular:  $minfg = \min \{ fg(i) : \forall s = 0, \dots, nlin - 1 \}$  y

$maxfg = \max \{ fg(i) : \forall s = 0, \dots, nlin - 1 \}$

7. Hacer  $LC = \{i \in V \setminus Sel : fg(i) \geq \alpha \cdot minfg + (1 - \alpha) \cdot maxfg\}$

8. Elegir  $s^* \in LC$  aleatoriamente

9. Hacer:  $AL(s^*) = AL(s^*) + 1$  y  $nbusasig = nbusasig + 1$

**Fin**

---

### 6.9 Procedimientos de mejora: búsqueda local y búsqueda tabú

Una vez obtenida una solución inicial, con el procedimiento constructivo en cuatro fases, anteriormente descrito, ésta se puede mejorar con procedimientos de mejora. En esta sección se proponen dos: un procedimiento de tipo búsqueda local (que denominaremos BLocal) y otro basado en la estrategia metaheurística búsqueda tabú (BTabu).

Ambos son procedimientos que se basan en movimientos vecinales. Es decir, son procedimientos iterativos que parten de una solución inicial y en cada iteración cambian de

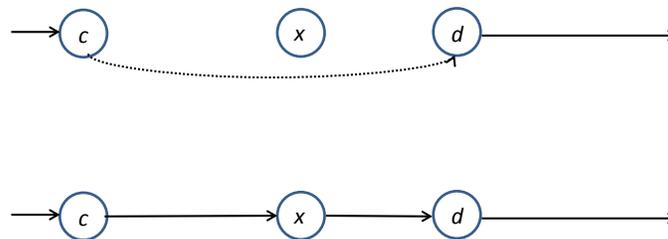
la solución actual a una solución vecina. En el caso de la búsqueda local, siempre se cambia de la solución actual, a una solución vecina mejor; y el procedimiento finaliza, cuando no hay soluciones vecinas que mejoren la actual. Un movimiento, en este contexto, se refiere al cambio de la solución actual, a una solución vecina. Por consiguiente, dada la solución actual, cada movimiento viene definido por la solución vecina correspondiente. Ésta es la razón por lo que en trabajos y descripciones de este tipo, se identifica movimiento con la solución vecina correspondiente.

Por lo tanto, para diseñar estos procedimientos se han de definir previamente el vecindario, o el conjunto de soluciones vecinas de la solución actual. En el caso de las soluciones vecinas son aquellas soluciones factibles a las que se llega por los siguientes tipos de movimientos.

**Figura 19**

**Inserción de la estación x**

- Tipo 1: Insertar una estación en una línea.

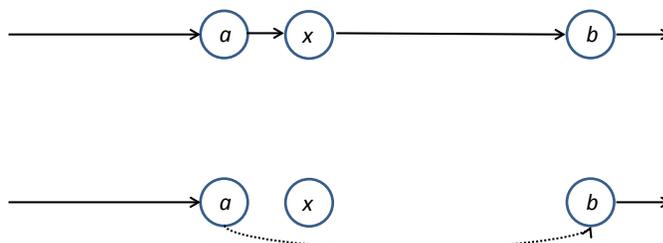


Fuente: Elaboración propia.

**Figura 20**

**Eliminación de la estación x**

- Tipo 2: Eliminar una estación de una línea.

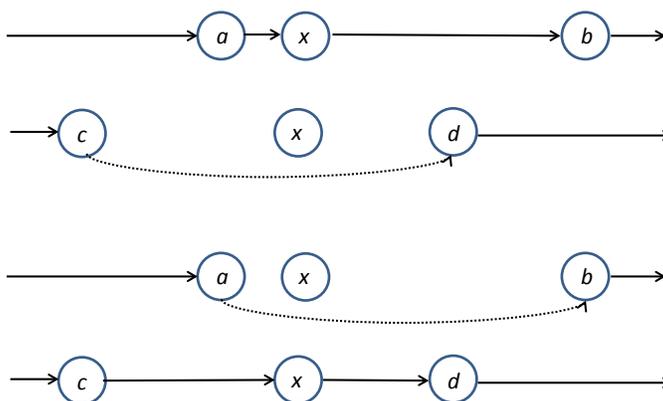


Fuente: Elaboración propia.

**Figura 21**

**Cambio de línea de la estación x**

- Tipo 3: Cambiar una estación de una línea a otra.



Fuente: Elaboración propia.

- Tipo 4: Cambiar un autobús de una línea a otra.
- Tipo 5: Cambiar simultáneamente una estación y un autobús de una línea a otra.

Hay que hacer notar que las soluciones vecinas, que se están considerando, deben ser factibles en el sentido de que el grafo correspondiente tenga todos los nodos conectados, según se ha explicado anteriormente. Para ello es necesario que todas las estaciones estén

cubiertas. Es decir, que pertenezcan a alguna línea con al menos un autobús asignado. La exploración de los diferentes tipos de movimientos se realiza en el orden lexicográfico anterior. Por otra parte, la exploración de los movimientos de tipo 5 se realiza solamente si, con los movimientos previos, no se consigue mejorar la solución actual.

Para la descripción más formal del algoritmo en pseudocódigo, sea  $S$  una solución cualquiera consideremos las siguientes definiciones:

- $N(S)$  : Conjunto de soluciones vecinas de  $S$ .
- $N^1(S)$  : Conjunto de soluciones obtenidas por los movimientos de tipo 1 a 4.
- $N^2(S)$  : Conjunto de soluciones obtenidas por los movimientos de tipo 5, (obviamente  $N(S) = N^1(S) \cup N^2(S)$ ).
- $f(S)$  : Valor de la función objetivo (en este caso se está considerando el tiempo total de viaje por persona).

De esta forma, el procedimiento de búsqueda local puede ser descrito de la forma siguiente:

### **Seudocódigo 5.-** Procedimiento de Búsqueda Local

---

Procedimiento **BLocal**(var  $S$ )

**Repetir**

1. Hacer  $fant = f(S)$
2. Hacer  $S_1 = \text{argmax}\{f(S'): S' \in N^1(S)\}$
3. Si  $f(S_1) \geq f(S)$  hacer  $S_1 = \text{argmax}\{f(S'): S' \in N^2(S)\}$
4. Si  $f(S_1) < f(S)$  hacer  $S = S_1$

**hasta**  $f(S_1) \geq fant$

---

Como se observa en cada iteración se cambia de la solución actual, a una solución vecina mejor. El proceso, por lo tanto, sólo admite movimientos a soluciones mejores y finaliza cuando no hay soluciones vecinas que mejoren la actual. En este caso se dice que se ha llegado a un óptimo local.

Hay que hacer notar la siguiente reflexión: en todos los movimientos de tipo 1, 2 y 3, que se consideren, al menos una de las líneas afectadas, deben tener un autobús asignado. Así por ejemplo, en los movimientos de tipo 1 ó 2 (inserciones o eliminaciones de estaciones en una línea), si la línea afectada no tiene autobuses asignados obviamente el movimiento no produce alteraciones en la función objetivo. En este caso,  $T_{total}$  (pero tampoco en ninguna de las otras funciones que se pueden considerar  $TEspera$  o  $NTransit$ ). En consecuencia es ocioso revisar los movimientos en este caso. Lo mismo se puede argumentar en los movimientos de tipo 3 (cambiar una estación de una línea a otra). En los movimientos de tipo 4 y 5, al llevar implícito al menos un cambio de un autobús de una línea a otra. Este cambio lleva consigo un cambio en la función objetivo (excepto quizás en situaciones muy particulares). En este caso hay que revisar que la línea que va a “ceder” el autobús tenga al menos uno asignado; ya que de otra forma, estos dos tipos de movimientos serían imposibles de realizar.

También se podría argumentar lo mismo en los movimientos de tipo 4 y 5. Sin embargo, en estos movimientos, al llevar implícito un cambio de un autobús de una línea a otra, la línea que va a “ceder” el autobús debe tener al menos un autobús (de lo contrario, el movimiento es imposible), y la línea.

El procedimiento de búsqueda tabú supone una modificación y generalización del procedimiento anterior. En cada iteración también se cambia de la solución actual a una solución vecina mejor. Sin embargo, no para en el primer óptimo local, sino que admite movimientos a soluciones peores. Además, para que el algoritmo no cicle y evitar volver a soluciones recién visitadas algunos movimientos se declaran “tabú” y no pueden ser ejecutados durante una serie de iteraciones. No obstante este status tabú puede ser ignorado en determinadas circunstancias (es lo que se denomina “criterio de aspiración”). Por ejemplo, en este caso, que el movimiento de lugar a una solución mejor que cualquier solución visitada durante el proceso.

De esta forma el procedimiento permite ir más allá del primer óptimo local y llegar en muchos casos a mejores soluciones. Obsérvese que los movimientos definidos pueden

suponer una o varias de las acciones siguientes: insertar una estación de una línea (tipos 1, 3 y 5), eliminar una estación de una línea (tipos 2, 3 y 5), quitar un autobús de una línea (tipos 4 y 5) o añadir un autobús a una línea (tipos 4 y 5).

Cuando se realiza un movimiento las acciones que supongan “deshacer” el movimiento se declaran tabú. Más concretamente la forma de actuar es la siguiente:

- Si se ha insertado una estación en una línea, durante una serie de iteraciones (*TenureOut*) se declara tabú la eliminación de esa estación de esa línea. Para identificar cuando la eliminación de una estación de una línea es tabú se hace uso de una matriz auxiliar,  $TabuIn(i, s)$ , que indica en que iteración ha sido insertado la estación  $i$  en la línea  $s$ . Por lo tanto, sea  $iter$  el contador de iteraciones, la eliminación de la estación  $i$  de la línea  $s$  es tabú si  $iter \leq tabuIn(i, s) + TenureOut$ . Es decir, si no han transcurrido *TenureOut* iteraciones desde su inserción.
- De igual forma, si se ha eliminado una estación en una línea, durante una serie de iteraciones (*TenureIn*) se declara tabú volver a insertar esa estación en esa línea. Análogamente al caso anterior se hace uso de una matriz auxiliar  $TabuOut(i, s)$ , que indica en que iteración ha sido eliminado la estación  $i$  de la línea  $s$ .
- Finalmente si se ha modificado el número de autobuses de una línea (añadiendo o quitando) durante una serie de iteraciones (*TenureBus*) se declaran tabú los movimientos que supongan que esta línea vuelva a tener el número anterior. Para ello, análogamente a los casos anteriores, se define la matriz  $TabuBus(s, l)$  como la iteración en la que la línea  $s$  ha dejado de tener asignados  $l$  autobuses.

La descripción en pseudocódigo es como sigue:

## Seudocódigo 6.- Procedimiento de Búsqueda Tabú

---

Procedimiento **BTabu**(*TenureIn*, *TenureOut*, *TenureBus*, *maxiter*; var *S*)

1. Hacer:  $iter = 0, S^* = S, iterbest = 0$
2. Iniciar matrices tabú:  
 $TabuIn(i, s) = -TenureOut; TabuOut(i, s) = -TenureIn \forall i \in V, \forall s = 0, \dots, nlin - 1$   
 $TabuBus(s, l) = -TenureBus \forall s = 0, \dots, nlin - 1, \forall l = 0, \dots, nbus$

### Repetir

3.  $iter = iter + 1$
4. Hacer  $S_1 = argmax\{f(S'): S' \in N^1(S), S' noestabúof(S') < f(S^*)\}$
5. Si  $f(S_1) \geq f(S)$  hacer:  
**Inicio**
  6.  $S_2 = argmax\{f(S'): S' \in N^2(S), S' noestabúof(S') < f(S^*)\}$
  7. Si  $f(S_2) < f(S_1)$  hacer  $S_1 = S_2$**Fin**
8. Hacer  $S = S_1$
9. Actualizar las matrices tabú correspondientes (según la explicación anterior)
10. Si  $f(S) < f(S^*)$  hacer:  $S^* = S$  e  $iterbest = iter$

**hasta**  $iter > iterbest + maxiter$

11. Hacer  $S = S^*$
- 

Como se observa, el proceso permite movimientos a peores soluciones. Por lo tanto, la solución actual  $S$  no tiene que coincidir con la mejor solución encontrada durante el proceso, que por tanto necesite ser guardada en la variable  $S^*$ . El *status* tabú de los diferentes movimientos se revisa con las matrices tabú correspondientes, como se ha explicado anteriormente. Finalmente, el parámetro *maxiter* se usa para establecer el criterio de parada (*maxiter* iteraciones sin mejorar  $S^*$ ).

Hay que indicar que la elección adecuada de los valores de los parámetros *TabuIn*, *TabuOut* y *TabuBus* es crítico para conseguir que el procedimiento sea eficaz: valor excesivamente bajos hacen que haya pocos movimientos tabú y el algoritmo pueda ciclar con facilidad. Por otra parte, valores altos puede hacer excesivo el número de movimientos tabú y hacer que el proceso esté encajonado (se permitan pocos movimientos).

## 6.10 Instancia real y generación de instancias pseudoreales

Se han estimado los valores de los datos de entrada (tiempos entre estaciones, tiempos por parada, de preparación y demandas entre estaciones, entre otros) correspondientes a la línea 1 del Metrobús en Ciudad de México, la cual transcurre a lo largo de la Avenida de los Insurgentes.

A continuación se muestra una tabla con los tiempos de viaje entre cada par de estaciones que constituyen la línea, los cuales se recabaron en distintos recorridos efectuados:

**Tabla 4**  
**Estaciones de la Línea 1 del Metrobús y tiempo de trayecto entre ellas**

Índice	Estaciones	Tiempo entre paradas (segundos)
0	Indios Verdes	
1	Deportivo 18 de Marzo	187
2	Euzkaro	110
3	Potrero	84
4	La Raza	117
5	Circuito	151
6	San Simón	129
7	Manuel González	123
8	Buenavista	84
9	El Chopo	128
10	Revolución	147
11	Plaza de la República	36
12	Reforma	38
13	Hamburgo	26
14	Glorieta Insurgentes	11
15	Durango	77
16	Álvaro Obregón	75
17	Sonora	62
18	Campeche	10
19	Chilpancingo	22
20	Nuevo León	44
21	La Piedad	75
22	Poliforum	54

<b>Índice</b>	<b>Estaciones</b>	<b>Tiempo entre paradas (segundos)</b>
23	Nápoles	26
24	Colonia del Valle	55
25	Ciudad de los Deportes	49
26	Parque Hundido	10
27	Félix Cuevas	51
28	Río Churubusco	63
29	Teatro Insurgentes	56
30	José María Velasco	61
31	Francia	49
32	Altavista	52
33	La Bombilla	72
34	Doctor Gálvez	57
35	Ciudad Universitaria	19
36	Centro Cultural Universitario	10
37	Perisur	10
38	Villa Olímpica	129
39	Corregidora	141
40	Ayuntamiento	126
41	Fuentes Brotantes	138
42	Santa Úrsula	91
43	La Joya	89
44	El Caminero	154

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto  $n = 45$ . Así el tiempo entre la estación cero (Indios Verdes) y la estación uno (Deportivo 18 de Marzo) es de 187 segundos; entre la estación uno y la estación dos es de 110 segundos; entre la estación dos y la estación tres es de 84 segundos; y así sucesivamente.

Por otra parte, el tiempo de retardo por cada parada ( $t_{par}$ ) se estima en cincuenta y cinco segundos y el tiempo de preparación al comienzo de cada semi-línea ( $t_{pre}$ ) se estima en treinta segundos.

En cuanto a las demandas entre estaciones se adjunta un anexo que muestra una tabla con las demandas que se han estimado estrictamente positivas. La tabla indica los índices de cada uno de los pares de estaciones (distinguiendo entre la inicial  $i$ , y final  $j$ ) y la demanda de pasajeros correspondiente ( $dem_{ij}$ ).

Se van a realizar una serie de pruebas computacionales para analizar los algoritmos que se han diseñado (constructivos, búsqueda local y búsqueda tabú). Para ello se han generado una serie de instancias en las que se probarán estos métodos. Estas instancias están basadas en los datos reales de la línea 1 del Metrobús, que se acaban de describir; de ahí que las denominemos instancias pseudoreales. Se obtienen seleccionando un subconjunto de estaciones del conjunto de estaciones reales. Los tiempos de viaje así como las demandas de viajeros entre las diferentes estaciones seleccionadas en estas instancias generadas son las mismas que en los datos reales originales. Entre este subconjunto de estaciones siempre se seleccionan el origen y final de cada sub-línea (es decir, “Indios Verdes” y “El Caminero”). El resto de las estaciones se seleccionan al azar. A continuación se muestra un cuadro con las características de los diferentes tipos de instancias pseudoreales generados y con los parámetros correspondientes.

**Tabla 5**

**Instancias pseudoreales**

<b>Tipo</b>	$n$	$nlin$	$Nbus$
<b>1</b>	11	2	5
<b>2</b>	22	3	10
<b>3</b>	33	4	15
<b>4</b>	44	5	20

Fuente: Elaboración propia.

Se van a generar diez instancias de cada tipo. Es decir, cuarenta instancias pseudoreales en total. Los tiempos de parada ( $t_{par}$ ) y de preparación ( $t_{pre}$ ) son iguales que en la instancia real (es decir, cincuenta y cinco y treinta segundos respectivamente). En las pruebas siguientes se enumeraran de forma consecutiva según los tipos. Es decir, las instancias del uno al diez son del tipo 1, las del once al veinte son del tipo 2, las de veintiuno al treinta son del tipo 3 y las del treinta y uno al cuarenta son del tipo 4.

## 6.11 Pruebas para analizar las fases del procedimiento constructivo

En esta sección se describen las pruebas realizadas para analizar las diferentes combinaciones de los parámetros de cada fase del procedimiento constructivo. La idea ha sido analizar estos parámetros en cada fase por separado. Por otra parte, para observar la calidad de las soluciones obtenidas es necesario ejecutar las cuatro fases. Teniendo en cuenta esto se ha optado por ejecutar las cuatro fases, cambiando los parámetros en la fase que se está analizando y dejando fijo los mismos en el resto de fases. Concretamente se dejan fijo a 1 ( $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1$ ). Es decir, se considera la versión determinística.

Además de ello para analizar en cada caso el efecto de la diversidad por aleatoriedad (valores de  $\alpha < 1$ ) o por penalizar frecuencias altas (valores de  $\beta < 1$ ) se ha de ejecutar el procedimiento varias veces (para cada combinación de los parámetros que se analice). Finalmente, hay que tener en cuenta lo siguiente: por el propio diseño de las fases A y B no hay ninguna estación (excepto las de índice 0 y  $n-1$ ) que estén en más de una línea. Es decir, tras las fases A y B cada estación intermedia pertenece exactamente a una línea; por otra parte la fase C, tal como está concebida, tiene como objeto asegurar que todas las estaciones estén cubiertas por algún autobús, y además solo deja asignar a lo sumo un autobús por línea. En definitiva, por lo anterior el resultado de la fase C siempre es la asignación de exactamente un autobús a cada línea.

Con otros diseños en la construcción de la línea que permitieran a las estaciones estar en más de una línea a la vez el resultado de la fase C podría ser diferente, ya que podrían cubrirse todas las estaciones sin asignar autobuses a todas las líneas. Sin embargo, con los diseños actuales de las fases A y B, entendemos que es ocioso ejecutar la fase C y hacer un análisis de sus parámetros. En su lugar la reemplazamos por la asignación de exactamente un autobús a cada línea.

Por todo lo anterior, se van a diseñar unos procedimientos para analizar los parámetros de cada fase (uno por fase). Así, para analizar los parámetros de la fase A se ha diseñado el procedimiento AnalisisFaseA de la forma siguiente:

## Seudocódigo 7.- Procedimiento de Análisis - Fase A

---

Procedimiento **AnalisisFaseA**( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $niter$ )

Hacer  $fbest = \infty$

Hacer:  $frq(i) = 0 \forall i \in V$ , y  $freq(i, j) = 0 \forall i, j \in V$  (Iniciar  $frq$  y  $freq$ )

**Desde**  $k = 0$  hasta  $niter - 1$  hacer:

**Inicio**

Ejecutar Fase A( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $frq$ )

Hacer  $frq(Sem(s)) = frq(Sem(s)) + 1, \forall s = 0, \dots, nlin - 1$  (Actualizar  $frq$ )

Ejecutar Fase B(1, 1,  $freq$ )

Hacer  $AL(s) = 1, \forall s = 0, \dots, nlin - 1$

Ejecutar Fase D(1, 1,  $frq$ )

Definir  $S = (SL, AL)$

Si  $f(S) < fbest$  hacer  $fbest = f(S)$

**Fin**

---

Como se puede observar los parámetros de las fases que no se analizan, se fijan a 1. Una vez definido el procedimiento de apoyo al análisis de la fase A, a continuación se ejecuta el mismo con diferentes combinaciones de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ . Concretamente se consideran las siguientes combinaciones:

**Tabla 6**  
**Combinación de parámetros**

# Combinación	$\alpha$	$\beta$
1	0.99	1
2	0.95	1
3	0.9	1
4	0.8	1
5	1	0
6	1	0.5

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, hay dos grupos de combinaciones: en las cuatro primeras combinaciones se analiza el efecto de los diferentes grados de aleatoriedad; mientras que en las dos últimas, se analiza el efecto de los diferentes grados de penalización de las

frecuencias. Es decir, el número de veces que las estaciones han sido elegidas como semillas, anteriormente.

En todos los casos ha considerado un valor de  $niter = 100$ . A continuación se muestran los resultados (valor de  $fbest$ ) de estas pruebas para cada combinación de parámetros.

**Tabla 7**  
**Resultados del análisis de los parámetros de la fase A**

Instancia #	Combinaciones ( $\alpha$ , $\beta$ )					
	1	2	3	4	5	6
1	40,00985	40,00985	40,00985	40,00985	40,00985	40,00985
2	36,11559	36,11559	36,11559	36,11559	36,11559	36,11559
3	47,58963	47,58963	47,58963	46,45486	40,01980	40,01980
4	59,75301	59,75301	59,75301	59,75301	51,06665	59,75301
5	55,15828	55,15828	55,15828	51,66543	51,66543	51,66543
6	38,20298	38,20298	38,20298	38,20298	38,20298	38,20298
7	46,82806	46,82806	46,82806	46,82806	46,82806	46,82806
8	47,60563	47,60563	47,60563	47,60563	47,60563	47,60563
9	40,25166	40,25166	40,25166	40,25166	40,25166	40,25166
10	49,03640	49,03640	49,03640	49,03640	49,03640	49,03640
11	70,39670	59,38241	59,38241	59,38241	59,66545	59,38241
12	53,31759	53,31759	53,31759	53,44422	54,25930	51,57487
13	46,80348	46,80348	46,80348	46,80348	46,80348	51,80680
14	58,46825	58,46825	58,46825	58,09803	58,00362	58,32470
15	56,14772	53,62173	52,45499	52,45499	52,45499	56,14772
16	54,03309	54,03309	54,03309	54,25722	54,47871	54,77540
17	50,20377	50,20377	50,12588	50,12588	50,12588	50,20377
18	53,78719	54,38479	54,38479	54,38479	51,74918	53,78719
19	50,70796	50,70796	50,70796	48,62796	48,62796	49,78443
20	59,16092	59,16092	56,12400	55,37002	54,49452	56,80419
21	61,71158	61,97494	60,43158	61,26079	60,00265	60,71666
22	59,54766	59,54766	60,67962	61,37625	59,85182	58,73063
23	61,86125	62,03729	63,15960	61,59888	63,33709	63,63629
24	62,67234	62,21320	62,60306	63,58084	62,55347	63,43773
25	60,27362	59,37849	58,33009	58,93483	59,66427	60,35512
26	65,03924	64,98086	63,49997	62,25450	64,99968	64,40933
27	60,90494	60,65911	60,80755	59,67740	63,52205	60,40156
28	62,09640	62,09640	62,17588	62,04825	62,59722	62,86474
29	63,38207	63,58646	64,10349	63,04634	62,85617	64,38946
30	61,73299	61,13686	62,28225	61,13686	61,67505	61,71186

Instancia #	Combinaciones ( $\alpha, \beta$ )					
	1	2	3	4	5	6
31	64,52354	64,87377	64,87377	64,56819	65,30975	65,78954
32	64,16593	64,23565	64,33690	65,78942	64,10818	65,91253
33	64,16593	64,23565	64,33690	65,78942	64,10818	65,91253
34	64,08856	64,97272	64,73009	64,82033	65,15222	64,63173
35	64,16427	65,10862	64,61266	63,96546	64,96007	65,40230
36	65,19423	64,97382	65,55254	65,40267	68,52051	67,42320
37	65,59369	65,25819	65,11646	66,73642	64,96455	67,24830
38	65,59369	65,25819	65,11646	66,73642	64,96455	67,24830
39	64,95036	64,21456	65,14183	66,35494	64,66151	66,57344
40	66,37436	64,66080	65,55650	65,40694	66,74243	66,70310

Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor comparación de los resultados se ha calculado para cada instancia los valores mínimo (*minf*) y máximo (*maxf*) obtenidos en esta tabla, y se calcula para cada combinación su valor “estandarizado” (*fest*) es decir  $fest = \frac{fbest-minf}{maxf-minf}$ . En el caso en que  $maxf = minf$  se toma  $fest = 0.5$ . A continuación se muestra una tabla con los valores medios de *fest* para cada combinación y cada tipo de instancia y con los valores medios en el conjunto de las instancias.

**Tabla 8**  
**Resultados del análisis de los parámetros de la fase A**  
**(Resumen con valores estandarizados)**

Tipo Instancia	Combinaciones ( $\alpha, \beta$ )					
	1	2	3	4	5	6
<b>1</b>	0,5500	0,5500	0,5500	0,5350	0,4500	0,4500
<b>2</b>	0,6922	0,5465	0,4498	0,2889	0,2126	0,6015
<b>3</b>	0,4841	0,3811	0,4716	0,3061	0,5313	0,6722
<b>4</b>	0,1951	0,2302	0,2703	0,5525	0,4503	0,9182
<b>Todas</b>	0,4804	0,4270	0,4354	0,4206	0,4110	0,6605

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar los mejores valores en el conjunto de las combinaciones se alcanzan con la combinación 5 ( $\alpha = 1, \beta = 0$ ). No obstante, en las instancias de mayor tamaño ( $n = 44$ ), que son las más similares a la instancia real, los mejores valores se da en

la combinación 1 ( $\alpha = 0.99$ ) entre las 4 primeras, y en la combinación 5 ( $\alpha = 1, \beta = 0$ ) entre el segundo grupo. A continuación se analiza una nueva combinación resultante de tomar el valor de  $\alpha$  de la combinación 1, con el valor de  $\beta$  de la combinación 5 ( $\beta = 0$ ). A esta nueva combinación la denominaremos combinación 7 ( $\alpha = 0.99, \beta = 0$ ). Los resultados de esta combinación, estandarizados (tomando los valores *minf* y *maxf* anteriores) se muestran en la tabla 9.

**Tabla 9**

**Resultados de la combinación 7**

Tipo Instancia	Combinación 7 $\alpha = 0.99, \beta = 0$
1	0,4500
2	0,2126
3	0,5313
4	0,4503
Todas	0,4110

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, esta nueva combinación, aunque tome los valores de las mejores combinaciones de cada grupo (1 y 5), no consigue superar a ninguna de ellas en las instancias de tipo 4.

De hecho obtiene los mejores resultados que la combinación 5, y peores que la 1.

A continuación se realiza un análisis de los parámetros de la fase B, análogamente a como se ha hecho con los de la fase A. Para analizar los parámetros de la fase B se ha diseñado el procedimiento AnalisisFaseB de la forma siguiente:

### Seudocódigo 8.- Procedimiento del Análisis - Fase B

Procedimiento **AnalisisFaseB**( $\alpha, \beta, niter; \text{var } fbest$ )

1. Hacer  $fbest = \infty$
2. Hacer:  $frq(i) = 0 \forall i \in V$ , y  $freq(i, j) = 0 \forall i, j \in V$  (Iniciar  $frq$  y  $freq$ )
3. Ejecutar Fase A(1, 1,  $frq$ )

**Desde**  $k = 0$  hasta  $niter - 1$  hacer:

**Inicio**

4. Hacer  $L_s = 0 - Sem(s) - (n - 1), \forall s = 0, \dots, nlin - 1$
5. Ejecutar Fase B ( $\alpha, \beta, freq$ )
6.  $\forall i \in L_s, i \neq Sem(s)$  hacer:  $freq(i, Sem(s)) = freq(i, Sem(s)) + 1$
7. Hacer  $AL(s) = 1, \forall s = 0, \dots, nlin - 1$
8. Ejecutar Fase D(1, 1,  $frq$ )
9. Definir  $S = (ST, AL)$  la solución obtenida
10. Si  $f(S) < fbest$  hacer  $fbest = f(S)$

**Fin**

Al igual que en el caso anterior, se ejecuta este procedimiento, considerando las combinaciones de  $\alpha$  y  $\beta$  de la tabla 9 y el valor de  $niter = 100$ . A continuación se muestran los resultados:

**Tabla 10**  
**Resultados del análisis de los parámetros de la fase B**

Instancia #	Combinaciones ( $\alpha, \beta$ )					
	1	2	3	4	5	6
1	38,57360	38,57360	38,25361	38,25361	38,57360	38,25361
2	36,11559	36,11559	36,11559	36,11559	36,11559	36,11559
3	47,58963	47,58963	47,58963	47,58963	40,02144	40,74111
4	59,75301	59,75301	58,03950	58,03950	49,99936	50,39866
5	55,15828	51,66543	51,66543	51,66543	40,72666	50,72666
6	36,52545	36,52545	36,52545	36,52545	36,52545	36,76301
7	46,82806	46,82806	46,82806	46,56224	44,81829	44,81829
8	47,60563	47,60563	47,60563	47,60563	47,60563	48,86269
9	40,25166	40,25166	40,19148	38,47602	37,59128	37,56058
10	49,03640	49,03640	49,03640	49,03640	49,57393	49,03640
11	70,39670	70,39670	68,18509	63,20349	61,55125	60,94191
12	53,30206	53,31759	54,13950	54,40792	53,99850	53,49173
13	52,04482	52,82145	53,61949	54,12001	54,41802	51,84789

Instancia #	Combinaciones ( $\alpha$ , $\beta$ )					
	1	2	3	4	5	6
14	58,46825	58,10840	58,08645	57,69643	57,98678	57,06400
15	56,14772	56,27923	56,27923	58,10448	60,75182	56,71969
16	54,77540	54,77540	54,77540	54,97355	56,08372	53,86437
17	50,20377	51,21848	52,10881	50,40188	52,42329	50,94464
18	53,78719	54,62408	55,33493	55,66895	54,93088	54,29248
19	50,13529	48,92316	49,07608	48,97199	49,24377	48,11113
20	56,85969	55,17041	55,57450	55,39931	54,28963	53,62966
21	61,71158	61,62237	61,79869	61,63013	63,27481	60,78114
22	59,72981	60,22764	60,53344	61,09729	62,58464	59,33886
23	61,86125	62,45828	61,52944	62,43615	63,09334	61,03565
24	62,85009	62,88564	62,56475	64,11522	64,69766	62,83061
25	60,35512	60,77976	61,59604	61,57129	59,64538	69,16343
26	65,40917	64,11530	64,79009	64,84911	64,42347	62,35432
27	60,57127	61,95124	61,60825	61,39077	62,54992	69,79584
28	61,88545	62,54395	62,54234	61,80898	62,29440	61,45756
29	62,77749	63,02424	62,99061	65,10330	65,27363	62,06637
30	62,07618	62,35765	64,84809	62,89485	65,00087	61,09344
31	64,28592	65,45679	66,13282	65,98301	66,70651	64,51448
32	64,96528	66,37337	65,36136	66,58277	66,94345	64,63463
33	64,96528	66,37337	65,36136	66,58277	66,94345	64,63463
34	64,12168	64,85845	65,91130	65,75877	66,06519	64,74040
35	63,74206	64,56907	65,84838	65,84096	66,78270	63,78730
36	67,22108	66,09895	67,66781	67,14027	67,33194	64,59483
37	65,89270	66,42892	67,63373	66,86460	67,84336	65,00993
38	65,89270	66,42892	67,63373	66,86460	67,84336	65,00993
39	66,21055	65,97492	67,12175	67,02073	66,79312	64,71330
40	66,58353	66,11909	66,97833	67,10310	67,55295	64,38476

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que antes, para una mejor comparación de los resultados se han tomado, para cada instancia, los valores mínimo y máximo, y se calcula para cada combinación su valor “estandarizado” (*fest*) como en el análisis anterior. A continuación se muestra una tabla con los valores medios de *fest* para cada combinación y cada tipo de instancia y con los valores medios en el conjunto de las instancias.

**Tabla 11**  
**Resultados del análisis de los parámetros de la fase B**  
**(Resumen con valores estandarizados)**

Tipo Instancia	Combinaciones ( $\alpha$ , $\beta$ )					
	1	2	3	4	5	6
<b>1</b>	0,5500	0,4712	0,3536	0,3404	0,2500	0,2636
<b>2</b>	0,4487	0,4356	0,6139	0,5561	0,6723	0,0898
<b>3</b>	0,3667	0,5099	0,5719	0,6407	0,8646	0,0125
<b>4</b>	0,3080	0,5203	0,7677	0,7875	0,9754	0,0428
<b>Todas</b>	0,4184	0,4842	0,5768	0,5812	0,6906	0,1022

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, los mejores resultados se obtienen con la combinación 6 (especialmente en las instancias de tipo 4). Entre las cuatro primeras combinaciones, la mejor en las instancias de tipo 4, la mejor es la 1. Al igual que antes, se analiza una nueva combinación resultante de tomar el valor de  $\alpha$  de la combinación 1, con el valor de  $\beta$  de la combinación 6 ( $\beta = 0.5$ ). Los resultados de esta combinación (combinación 7) estandarizados se muestran a continuación:

**Tabla 12**  
**Resultados de la combinación 7**

Tipo Instancia	Combinación 7 $\alpha = 0.99$ , $\beta = 0.5$
1	0,2636
2	0,0018
3	-0,1039
4	0,1104
Todas	0,0680

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, esta nueva combinación resulta ser mejor que la combinación 1, y también mejor que la combinación 6, en el conjunto de todas las instancias. No obstante, no supera a la combinación 6 en las del de tipo 4 específicamente.

Finalmente se realiza un análisis de los parámetros de la Fase D, análogamente a como se ha hecho en las fases anteriores. Para analizar los parámetros de la fase D se ha diseñado el procedimiento AnalisisFaseD de la forma siguiente:

### Seudocódigo 9.- Procedimiento del Análisis - Fase D

Procedimiento **AnalisisFaseD**( $\alpha, \beta, niter$ ; var  $fbest$ )

1. Hacer  $fbest = \infty$
2. Hacer:  $frq(i) = 0 \forall i \in V$ ,  
 $freq(i, j) = 0 \forall i, j \in Vy$   
 $frq1(s) = 0 \forall s = 0, \dots, nlin - 1$  (Iniciar  $frq, freq$  y  $frq1$ )
3. Ejecutar Fase A(1, 1,  $frq$ )
4. Ejecutar Fase B (1, 1,  $freq$ )

**Desde**  $k = 0$  hasta  $niter - 1$  hacer:

**Inicio**

5. Hacer  $AL(s) = 1, \forall s = 0, \dots, nlin - 1$
6. Ejecutar Fase D( $\alpha, \beta, frq1$ )
7. Hacer  $frq1(s) = frq1(s) + AL(S) \forall s = 0, \dots, nlin - 1$
8. Definir  $S = (ST, AL)$  la solución obtenida
9. Si  $f(S) < fbest$  hacer  $fbest = f(S)$

**Fin**

Al igual que en el caso anterior, se ejecuta este procedimiento, considerando las combinaciones de  $\alpha$  y  $\beta$  de la tabla 12 y el valor de  $niter = 100$ . A continuación se muestran los resultados:

**Tabla 13**  
**Resultados del análisis de los parámetros de la fase D**

Instancia #	Combinaciones ( $\alpha, \beta$ )					
	1	2	3	4	5	6
1	40,00985	40,00985	40,00985	40,00985	40,41097	36,96983
2	36,11559	36,11559	36,11559	36,11559	43,30538	36,11559
3	47,58963	47,58963	47,58963	47,58963	37,46356	37,10965
4	59,75301	59,75301	59,75301	59,75301	48,18696	47,81947
5	55,15828	55,15828	55,15828	55,15828	46,77314	46,77314
6	38,20298	38,20298	38,20298	38,20298	43,47808	38,16489

Instancia #	Combinaciones ( $\alpha$ , $\beta$ )					
	1	2	3	4	5	6
7	46,82806	46,82806	46,82806	46,82806	51,88156	44,40525
8	47,60563	47,60563	47,60563	47,60563	48,13565	46,43654
9	40,25166	40,25166	40,25166	40,25166	40,26952	35,38032
10	49,03640	49,03640	49,03640	49,03640	55,82347	49,03640
11	70,39670	70,39670	70,39670	70,39670	59,28437	57,22456
12	53,72955	53,72955	53,72955	53,72955	54,60632	50,50661
13	46,80348	46,59329	46,59329	46,59329	56,34617	50,32451
14	58,46825	58,46825	58,46825	58,46825	59,89658	57,41971
15	56,14772	56,14772	56,14772	56,14772	63,98395	55,91778
16	54,03309	54,03309	54,03309	54,03309	58,37263	52,92249
17	50,20377	50,20377	50,20377	50,20377	54,24771	48,75977
18	51,60158	51,60158	51,60158	51,60158	57,04057	50,99197
19	50,70796	50,70796	50,70796	50,38124	50,38124	47,77829
20	59,16092	58,33973	58,33973	58,33973	54,91501	52,21619
21	61,71158	61,71158	61,71158	61,71158	63,29206	60,39533
22	59,54766	59,54766	59,54766	59,54766	60,33478	57,55075
23	61,86125	61,48778	61,48778	61,08795	61,65607	59,82187
24	62,67234	62,67234	62,67234	62,67234	64,36378	60,86480
25	60,35512	60,35512	60,35512	59,82848	60,63460	58,18096
26	65,03924	65,03924	65,03924	65,03924	65,63369	62,27972
27	60,90494	60,90494	60,90494	60,90494	63,04791	58,20087
28	62,09640	62,09640	62,09640	62,09640	62,86633	61,11786
29	63,38207	63,38207	63,38207	63,20262	63,89084	59,83504
30	61,73299	61,73299	61,73299	61,73299	62,46658	59,82093
31	64,52354	63,71241	64,32336	63,94088	66,14700	62,58575
32	64,16593	64,81162	64,81162	64,81162	65,24084	61,72468
33	64,16593	64,81162	64,81162	64,81162	65,24084	61,72468
34	64,08856	63,56536	64,08856	64,17239	67,78460	62,61420
35	64,16427	64,16427	64,16427	64,16427	66,28403	62,62775
36	65,19423	65,19423	65,19423	65,19423	66,17815	64,39351
37	65,59369	65,59369	65,59369	65,59369	71,45589	62,48841
38	65,59369	65,59369	65,59369	65,59369	71,45589	62,48841
39	64,95036	64,95036	64,95036	64,95036	66,58234	62,62470
40	66,37436	66,37436	66,37436	66,37436	70,86399	63,33125

Fuente: Elaboración propia.

Como antes, para una mejor comparación de los resultados, se ha tomado para cada instancia los valores mínimo y máximo, y se calcula para cada combinación su valor “estandarizado” (*fest*). A continuación se muestra una tabla con los valores medios de *fest*

para cada combinación y para cada tipo de instancia y con los valores medios en el conjunto de las instancias.

**Tabla 14**  
**Resultados del análisis para los parámetros de la fase D**  
**(Resumen con valores estandarizados)**

<b>Tipo Instancia</b>	<b>Combinaciones (<math>\alpha</math>, <math>\beta</math>)</b>					
	1	2	3	4	5	6
<b>1</b>	0,4903	0,4903	0,4903	0,4903	0,6065	0,0000
<b>2</b>	0,4827	0,4687	0,4687	0,4576	0,8433	0,0383
<b>3</b>	0,7112	0,6929	0,6929	0,6474	0,9899	0,0000
<b>4</b>	0,4771	0,4809	0,5082	0,4991	1,0000	0,0000
<b>Todas</b>	0,5403	0,5332	0,5400	0,5236	0,8599	0,0096

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, los mejores resultados se obtienen con la combinación 6 (especialmente en las instancias de tipo 3 y 4, donde obtiene la mejor solución en todos los casos). Entre las cuatro primeras combinaciones, la mejor, en las instancias de tipo 4 es la combinación 1. Al igual que antes, se analiza una nueva combinación resultante de tomar el valor de  $\alpha$  de la combinación 1, con el valor de  $\beta$  de la combinación 6 ( $\beta = 0.5$ ). Los resultados de esta combinación (combinación 7) estandarizados se muestran a continuación:

**Tabla 15**  
**Resultados de la combinación 7**

<b>Tipo Instancia</b>	<b>Combinación 7 <math>\alpha = 0.99, \beta = 0.5</math></b>
1	0,1000
2	0,0260
3	-0,0324
4	0,0233
Todas	0,0292

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, los resultados son similares a los obtenidos con los análisis de las fases A y B. La nueva combinación mejora los resultados de la combinaciones 1, pero no las de la

combinación 6, ni globalmente ni en las instancias de tipo 4 (aunque en este caso, sí que obtiene mejores resultados en las instancias de tipo 3 muy ligeramente).

Finalmente se va a diseñar un procedimiento, que denominaremos TodasFases, que ejecuta las tres fases (A, B y C), pero permitiendo elegir los parámetros en cada una de ellas. A continuación se muestra su pseudocódigo.

---

### Pseudocódigo 10.- Procedimiento TodasFases

---

Procedimiento **TodasFases**( $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3, \beta_3, niter$ ; var  $S$ )

1. Hacer  $fbest = \infty$
2. Hacer:  $frq(i) = 0 \forall i \in V$ ,  
 $freq(i, j) = 0 \forall i, j \in V$   
 $frq1(s) = 0 \forall s = 0, \dots, nlin - 1$  (Iniciar  $frq, freq$  y  $frq1$ )

**Desde**  $k = 0$  hasta  $niter - 1$  hacer:

**Inicio**

3. Ejecutar Fase A( $\alpha_1, \beta_1, frq$ )
4. Hacer  $frq(Sem(s)) = frq(Sem(s)) + 1, \forall s = 0, \dots, nlin - 1$  (Actualizar  $frq$ )
5. Ejecutar Fase B( $\alpha_2, \beta_2, freq$ )
6.  $\forall i \in L_s, i \neq Sem(s)$  hacer:  $freq(i, Sem(s)) = freq(i, Sem(s)) + 1$
7. Hacer  $AL(s) = 1, \forall s = 0, \dots, nlin - 1$
8. Ejecutar Fase D( $\alpha_3, \beta_3, frq1$ )
9. Hacer:  $frq1(s) = frq1(s) + AL(S) \forall s = 0, \dots, nlin - 1$
10. Definir  $S = (SL, AL)$
11. Si  $f(S) < fbest$  hacer  $fbest = f(S)$  y  $S^* = S$

**Fin**

12.  $S = S^*$
- 

Obsérvese que este procedimiento es análogo al procedimiento AnalisisFaseB, pero en este nuevo procedimiento (TodasFases) se permite elegir los parámetros en todas las fases. Análoga comparación se puede hacer con los procedimientos AnalisisFaseB y AnalisisFaseD. Se ha ejecutado este procedimiento con las tres combinaciones de parámetros que mejor han resultado para cada fase en las anteriores pruebas. Es decir,  $\alpha_1 = 0.99, \beta_1 = 1, \alpha_2 = 1, \beta_2 = 0.5, \alpha_3 = 0.99$  y  $\beta_3 = 0.5$ . A continuación se muestra una tabla con los resultados, junto con los obtenidos por cada una de las mejores combinaciones, en los

tres análisis anteriores (de las fases A, B y C). Se marca en negrita el mejor resultado para cada instancia.

**Tabla 16**  
**Resultados del análisis de los parámetros de todas las fases**

Instancia #	AnalisisFaseA $\alpha = 0.99, \beta = 1$	AnalisisFaseB $\alpha = 1, \beta = 0.5$	AnalisisFaseD $\alpha = 1, \beta = 0.5$	TodasFases $\alpha_1 = 0.99, \beta_1 = 1,$ $\alpha_2 = 1, \beta_2 = 0.5,$ $\alpha_3 = 1, \beta_3 = 0.5$
1	40,00985	38,25361	<b>36,96983</b>	37,80767
2	36,11559	36,11559	36,11559	<b>35,53096</b>
3	47,58963	40,74111	<b>37,10965</b>	<b>37,10965</b>
4	59,75301	50,39866	<b>47,81947</b>	48,45146
5	55,15828	50,72666	<b>46,77314</b>	49,46432
6	38,20298	<b>36,76301</b>	38,16489	36,76554
7	46,82806	44,81829	<b>44,40525</b>	44,56604
8	47,60563	48,86269	<b>46,43654</b>	<b>46,43654</b>
9	40,25166	37,56058	<b>35,38032</b>	37,56058
10	<b>49,03640</b>	<b>49,03640</b>	<b>49,03640</b>	<b>49,03640</b>
11	70,39670	60,94191	<b>57,22456</b>	60,41007
12	53,31759	53,49173	<b>50,50661</b>	52,93764
13	<b>46,80348</b>	51,84789	50,32451	51,72580
14	58,46825	57,06400	<b>57,41971</b>	57,65834
15	56,14772	56,71969	<b>55,91778</b>	56,65565
16	54,03309	53,86437	<b>52,92249</b>	53,86437
17	50,20377	50,94464	<b>48,75977</b>	50,34109
18	53,78719	54,29248	<b>50,99197</b>	52,86259
19	50,70796	48,11113	<b>47,77829</b>	48,22092
20	59,16092	53,62966	<b>52,21619</b>	52,95161
21	61,71158	60,78114	<b>60,39533</b>	61,16570
22	59,54766	59,33886	<b>57,55075</b>	58,41584
23	61,86125	61,03565	<b>59,82187</b>	62,17780
24	62,67234	62,83061	60,86480	<b>60,70200</b>
25	60,27362	59,16343	<b>58,18096</b>	58,97963
26	65,03924	62,35432	62,27972	<b>62,08973</b>
27	60,90494	59,79584	<b>58,20087</b>	59,79584
28	62,09640	61,45756	<b>61,11786</b>	61,27760
29	63,38207	62,06637	<b>59,83504</b>	62,59824
30	61,73299	61,09344	<b>59,82093</b>	61,86048
31	64,52354	64,51448	<b>62,58575</b>	63,54222
32	64,16593	64,63463	<b>61,72468</b>	64,70177

Instancia #	AnalisisFaseA $\alpha = 0.99, \beta = 1$	AnalisisFaseB $\alpha = 1, \beta = 0.5$	AnalisisFaseD $\alpha = 1, \beta = 0.5$	TodasFases $\alpha_1 = 0.99, \beta_1 = 1,$ $\alpha_2 = 1, \beta_2 = 0.5,$ $\alpha_3 = 1, \beta_3 = 0.5$
33	64,16593	64,63463	<b>61,72468</b>	64,70177
34	64,08856	64,74040	<b>62,61420</b>	64,34007
35	64,16427	63,78730	<b>62,62775</b>	63,96955
36	65,19423	64,59483	64,39351	<b>63,49540</b>
37	65,59369	65,00993	<b>62,48841</b>	65,13286
38	65,59369	65,00993	<b>62,48841</b>	65,13286
39	64,95036	64,71330	<b>62,62470</b>	65,85695
40	66,37436	64,38476	<b>63,33125</b>	64,66312

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, el procedimiento AnalisisFaseD consigue los mejores resultados en 34 de las 40 instancias, además de en 9 de las 10 instancias de tipo 4. Por tanto, tras este amplio análisis del método constructivo, es claro que la combinación de parámetros más adecuada para las diferentes fases del método constructivo es  $\alpha = 1, \beta = 1$  para las fases A y B, y  $\alpha = 1, \beta = 0.5$  para la fase D, al menos con un número de 100 repeticiones. En otras palabras con niter = 100 repeticiones los mejores parámetros del procedimiento TodasFases son  $\alpha_1 = 1, \beta_1 = 1, \alpha_2 = 1, \beta_2 = 1, \alpha_3 = 1$  y  $\beta_3 = 0.5$ . Esto es interesante, porque la diversidad en la asignación de autobuses a líneas (obtenida por penalización de frecuencias) resulta ser el camino más eficaz para encontrar mejores soluciones iniciales. No obstante, estos experimentos dejan abiertos a su vez muchas más posibilidades de análisis, combinaciones y experiencias con las fases de este procedimiento constructivo, o con otros procedimientos similares.

## 6.12 Pruebas con búsqueda local

El grupo de pruebas que se van a describir a continuación tiene por objeto analizar el procedimiento de búsqueda local diseñado en secciones anteriores. Concretamente se quieren analizar los siguientes aspectos: la capacidad de este método para mejorar las soluciones iniciales de partida y la dependencia de las soluciones iniciales (o en otras palabras, la influencia de las soluciones iniciales, en las soluciones finales, obtenidas por la búsqueda local).

Para ello se ha ejecutado este procedimiento de búsqueda local en las instancias pseudoreales considerando para cada instancia dos soluciones iniciales: la soluciones obtenidas mediante la ejecución del procedimiento TodasFases con los parámetros  $\alpha_1 = 1$ ,  $\beta_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = 1$ ,  $\beta_2 = 1$ ,  $\alpha_3 = 1$ ,  $\beta_3 = 1$  y  $niter = 100$ ; y la obtenida con el mismo procedimiento con los parámetros  $\alpha_1 = 1$ ,  $\beta_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = 1$ ,  $\beta_2 = 1$ ,  $\alpha_3 = 1$ ,  $\beta_3 = 0.5$  y  $niter = 100$ . Obsérvese que el primer caso consiste en la ejecución de la versión determinística del procedimiento constructivo; mientras que la segunda consiste en la repetición de 100 veces de la ejecución del procedimiento constructivo, con la mejor combinación posible de parámetros. Es de esperar que las diferencias entre las soluciones obtenidas en ambas formas sean notables, y por tanto, nos sirvan para apreciar, en su caso, el efecto de estas soluciones iniciales en las soluciones obtenidas por el procedimiento de búsqueda local.

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos por este experimento. Para cada instancia se muestra los valores de las siguientes soluciones: la solución inicial “determinística”; la obtenida por la búsqueda local, a partir de ésta (Determinística+BLocal); la solución inicial obtenida por el procedimiento TodasFases, con la mejor combinación de parámetros antes comentada (TodasFases); y la obtenida por la búsqueda local, a partir de ésta (TodasFases+BLocal). Se marca con “\*” para cada instancia, en su caso, las soluciones que son estrictamente mejores que las demás.

**Tabla 17**

**Resultados del análisis de búsqueda local, con diferentes soluciones iniciales**

Instancia #	Deterministica	Deterministica +BLocal	TodasFases	TodasFases +BLocal
1	42,59402	31,53969	36,96983	31,53969
2	36,11559	26,09744	36,11559	26,09744
3	47,58963	27,07663	37,10965	27,07663
4	59,75301	37,99000	47,81947	37,99000
5	55,15828	37,14667	46,77314	37,14667
6	39,70615	29,91497	38,16489	29,91497
7	47,83239	35,38942	44,40525	35,38942
8	52,70905	36,44717	46,43654	36,44717
9	40,26952	29,99167	35,38032	29,99167
10	50,62986	34,04533	49,03640	34,04533
11	79,40907	32,26119	57,22456	32,25416 *

Instancia #	Deterministica	Deterministica +BLocal	TodasFases	TodasFases +BLocal
12	53,96998	34,23609	50,50661	33,52179 *
13	55,93946	38,27476	50,32451	37,92196 *
14	58,46825	34,25925	57,41971	34,25925
15	59,62539	36,52256	55,91778	36,51392 *
16	54,86855	38,61163	52,92249	38,23006 *
17	54,01098	37,09123	48,75977	36,86114 *
18	63,19974	41,99992	50,99197	41,99992
19	50,99748	32,11905 *	47,77829	32,21757
20	60,65405	32,25407 *	52,21619	32,26037
21	72,15624	32,27773 *	60,39533	32,29726
22	63,25562	34,05400	57,55075	34,05400
23	67,79965	32,65281	59,82187	32,59533 *
24	77,94378	33,92232	60,86480	33,86291 *
25	70,44787	32,12507	58,18096	32,12507
26	69,13906	31,55917	62,27972	31,47691 *
27	69,34191	33,08789 *	58,20087	33,12311
28	67,91854	31,76766	61,11786	31,76766
29	75,91125	31,58152	59,83504	31,53607 *
30	69,24453	34,06170	59,82093	34,06170
31	74,94655	30,03371 *	62,58575	30,06368
32	67,79659	30,02924	61,72468	29,89196 *
33	67,79659	30,02924	61,72468	29,89196 *
34	70,65245	32,05086	62,61420	29,88314 *
35	75,74479	29,75151	62,62775	29,75151
36	68,95209	28,98731 *	64,39351	29,00066
37	71,94524	29,57995 *	62,48841	31,80813
38	71,94524	29,57995 *	62,48841	31,80813
39	68,09305	31,48042	62,62470	30,04383 *
40	69,01168	28,98001 *	63,33125	31,25603

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados de la tabla se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Como era de esperar, de las dos formas para construir soluciones iniciales, la segunda da mejores soluciones que la primera: en la primera sólo se ejecuta una vez el constructivo; y en la segunda, se repiten varias veces la ejecución del constructivo, con una combinación adecuada de parámetros, que favorece la

generación de soluciones eficientes. No obstante llama la atención la diferencia entre las soluciones obtenidas.

- La diferencia entre las soluciones iniciales y las obtenidas por búsqueda local son realmente importantes. Si nos centramos en las instancias de tipo 4, se reduce la función objetivo en torno al 50%, cuando se parte de la solución determinística; y un 45%, cuando se parte de la segunda solución inicial. Entendemos que esto se debe a que el procedimiento constructivo, con todas sus fases, no usa la función objetivo para seleccionar los diferentes elementos. En su lugar, usa criterios o funciones auxiliares más rápidas de calcular, que se relacionaban de forma razonable con la función objetivo. A pesar de no ser la función objetivo propiamente dicha. Luego se puede entender que es un procedimiento “ciego”. Por su parte, la búsqueda local, que sí calcula la función objetivo para todas las soluciones visitadas en cada iteración y el valor de la correspondiente función objetivo es el que guía la búsqueda. Por el contrario, precisamente por el coste (en términos de tiempo de computación) del cálculo de la función objetivo, los procedimientos de búsqueda local requieren mucho más tiempo de computación.
- Las soluciones a las que llega la búsqueda local son muy parecidas en ambos casos (partiendo de la solución determinística o partiendo de la obtenida por TodasFases). Se observa que en 14 casos que la búsqueda local llega a soluciones estrictamente mejor cuando parte de la solución obtenida por TodasFases, mientras que en nueve casos, llega a soluciones estrictamente mejor cuando parte de la solución determinística. En el resto de los casos se llega a la misma solución. Luego no parece que haya una clara dependencia de las soluciones iniciales, sino quizás una muy ligera dependencia. Esto sin ser habitual tampoco es excesivamente raro, pues depende de la estructura de los diferentes vecindarios y regiones de búsqueda.

### 6.13 Pruebas con búsqueda tabú

En esta sección se describen un grupo de pruebas que tienen por objeto analizar el procedimiento de búsqueda tabú diseñado anteriormente. Concretamente se quiere analizar la capacidad de este método para mejorar las soluciones iniciales de partida, la capacidad para obtener mejor soluciones que la búsqueda local y los valores más adecuados de los parámetros (*TenureIn*, *TenureOut*, *TenureBus*).

Para ello, como en casos anteriores, se ha ejecutado este procedimiento de búsqueda tabú en las instancias pseudoreales. Se han realizado tres ejecuciones de la búsqueda tabú, considerando las tres siguientes combinaciones de parámetros:

**Tabla 18**  
**Diferentes combinaciones de los parámetros de búsqueda tabú**

Combinación	<i>TenureIn</i>	<i>TenureOut</i>	<i>TenureBus</i>
1	Round( $n/2$ )	Round( $n/2$ )	Round( $nlin/2$ )
2	$n$	$n$	$nlin$
3	$2 \cdot n$	$2 \cdot n$	$2 \cdot nlin$

Fuente: Elaboración propia.

En todos los casos se ha usado, como solución de partida, la obtenida por el procedimiento TodasFases, con la combinación usada en la sección anterior. Es decir, la mejor combinación analizada y el valor del parámetro *maxiter* es  $5 \cdot n$ . A continuación se muestran los resultados obtenidos por la búsqueda tabú, con cada una de las anteriores combinaciones. También se añade, para una mejor comparación y análisis, los resultados del procedimiento de búsqueda local, cuando parte de la misma solución inicial. Se marca con “\*” para cada instancia, la mejor solución obtenida por búsqueda tabú (se omiten los empates entre las tres) y con “+” las soluciones obtenidas búsqueda tabú que son mejor que la obtenida por búsqueda local.

**Tabla 19**

**Resultados del análisis de búsqueda tabú con diferentes combinaciones de parámetros**

Instancia #	TodasFases	Búsqueda Tabú			BLocal
		Combin. 1	Combin. 2	Combin. 3	
1	36,96983	31,53969	31,53969	31,53969	31,53969
2	36,11559	26,09744	26,09744	26,09744	26,09744
3	37,10965	27,07663	27,07663	27,07663	27,07663
4	47,81947	37,99000	37,99000	37,99000	37,99000
5	46,77314	37,14667	37,14667	37,14667	37,14667
6	38,16489	29,91497	29,91497	29,91497	29,91497
7	44,40525	35,38942	35,38942	35,38942	35,38942
8	46,43654	36,44717	36,44717	36,44717	36,44717
9	35,38032	29,99167	29,99167	29,99167	29,99167
10	49,03640	34,04533	34,04533	34,04533	34,04533
11	57,22456	32,25416	31,72090 * +	31,72090 * +	32,25416
12	50,50661	33,51808 +	33,25524 * +	33,52179	33,52179
13	50,32451	37,43383 +	37,43383 +	37,43383 +	37,92196
14	57,41971	34,25925	34,25925	34,25925	34,25925
15	55,91778	36,51392	36,40818 * +	36,40818 * +	36,51392
16	52,92249	38,23006	37,95232 * +	37,95232 * +	38,23006
17	48,75977	36,61994 +	36,50681 * +	36,50681 * +	36,86114
18	50,99197	41,99992	41,99992	41,99992	41,99992
19	47,77829	32,11905 +	31,73952 * +	31,73952 * +	32,21757
20	52,21619	32,25407 +	31,64854 * +	31,64854 * +	32,26037
21	60,39533	32,27482 +	32,27773 * +	32,27773 * +	32,29726
22	57,55075	34,03686 +	34,03686 +	34,02174 * +	34,05400
23	59,82187	32,59533	32,59533	32,59533	32,59533
24	60,86480	33,82018 +	33,82018 +	33,82018 +	33,86291
25	58,18096	32,12507	32,12507	32,12507	32,12507
26	62,27972	31,46654 * +	31,47691	31,47691	31,47691
27	58,20087	33,01347 +	33,01347 +	33,01347 +	33,12311
28	61,11786	31,76766	31,76766	31,76766	31,76766
29	59,83504	31,53607	31,53401* +	31,53607	31,53607
30	59,82093	34,06170	34,06170	34,06170	34,06170
31	62,58575	30,04415 * +	30,06196 +	30,06196 +	30,06368
32	61,72468	29,89196	29,89196	29,89196	29,89196
33	61,72468	29,89196	29,89196	29,89196	29,89196
34	62,61420	29,87162 * +	29,87365 +	29,88314	29,88314
35	62,62775	29,75151	29,75151	29,75151	29,75151
36	64,39351	29,00066	29,00066	29,00066	29,00066
37	62,48841	29,57995 +	29,57995 +	29,57995 +	31,80813
38	62,48841	29,57995 +	29,57995 +	29,57995 +	31,80813

Instancia #	TodasFases	Búsqueda Tabú			BLocal
		Combin. 1	Combin. 2	Combin. 3	
39	62,62470	30,04383	30,04383	30,04383	30,04383
40	63,33125	29,00532 +	28,98001* +	29,00532 +	31,25603

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados de la tabla 19, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Al igual que la búsqueda local, la búsqueda tabú mejora sustancialmente los resultados de la solución inicial. Esta mejora es más significativa, a medida que los tamaños de las instancias son mayores. En el caso de las instancias de tipo 4, este tamaño llega a un 40%.
- Los resultados son relativamente similares para las diferentes ejecuciones de la búsqueda tabú. No obstante se aprecian ciertas diferencias a favor de las diferentes combinaciones, que van cambiando según el tamaño de las instancias. Así inicialmente, en las instancias de tipo 1 no hay diferencia alguna entre las diferentes combinaciones (que además tampoco superan a la búsqueda local en ningún caso). En las instancias de tipo 2, las diferencias son a favor de las combinaciones de tipo 2 y 3 (en seis combinaciones). Dichas combinaciones empatan y son estrictamente mejores que la combinación 1; y en una instancia, la combinación 2, supera a las otras dos. En las instancias de tipo 3, se vuelve a ver cierto equilibrio entre las tres combinaciones (cada combinación supera a las otras dos estrictamente en una instancia y las combinaciones 2 y 3 empatan y son estrictamente mejores que la combinación 1 en una instancia). Finalmente, en las instancias de tipo 4, se vuelve a ver bastante igualdad, pero con diferencias a favor de la combinación 1 (que supera a las otras dos en dos instancias, mientras que la combinación 2 supera a las otras dos en una instancia). Luego, en definitiva, los resultados son muy similares. Sin embargo, quizás se puede intuir que, a medida que crece el tamaño de las instancias, sea mejor usar tamaños de lista tabú más moderados.

- En cuanto a la comparación de la búsqueda local y de la búsqueda tabú se observa que en las instancias de tipo 1 ninguna ejecución de la búsqueda tabú supera a la búsqueda local. Sin embargo, en instancias mayores, ya se aprecian diferencias que, en algunos casos, son pequeñas, pero en otros son más notables. Por ejemplo: en la instancias 37, 38 y 40 la diferencia es de 2 más de minutos. Concretamente, alguna de las combinaciones de la búsqueda tabú superan a la búsqueda local en 19 instancias, y todas las combinaciones superan a la búsqueda local en 11 instancias.

#### **6.14 *MultiStartTabu***

Con el objeto de mejorar los resultados del procedimiento de búsqueda tabú, introduciendo la diversificación que proporciona el procedimiento constructivo con los parámetros adecuados, se ha diseñado un nuevo procedimiento de búsqueda tabú multi-arranque o también denominado *MultiStartTabu* que generaliza el procedimiento de búsqueda tabú. Básicamente, consiste en ejecutar el procedimiento de búsqueda tabú varias veces, comenzando cada vez en una solución inicial diferente. Estas soluciones iniciales se generan, a partir de la segunda, teniendo en cuenta las características de las soluciones visitadas durante las ejecuciones anteriores de la búsqueda tabú. De esta forma, en la construcción de las nuevas soluciones iniciales, se penaliza la introducción de las características que más han aparecido y se favorece la introducción de las que menos han aparecido en estas ejecuciones. Para ello, inicialmente se modifica ligeramente el procedimiento de búsqueda tabú, tal como se describe a continuación, para actualizar la información de las veces que han aparecido cada par de estaciones en la misma línea, en el conjunto de soluciones visitadas.

Más concretamente, la descripción en pseudocódigo del procedimiento de búsqueda tabú es como sigue:

### Seudocódigo 11.- Modificación de la Búsqueda Tabú

---

Procedimiento **BTabuModificado**(*TenureIn*, *TenureOut*, *TenureBus*, *maxiter*; var *freq*; var *S*)

En el procedimiento **BTabu** añadir después del paso 2 (en el buche Repetir - hasta) el paso 2bis como sigue

2.bis  $\forall s = 0, \dots, nlin - 1, \forall i, j \in Lin(s), i \neq j, i, j \neq 0, n - 1$  hacer  
 $freq(i, j) = freq(i, j) + 1$

---

Por otra parte, la construcción de las soluciones iniciales se basa en el uso de las fases del método constructivo, propuesto tal como se describe a continuación.

### Seudocódigo 12.- Procedimiento *Multi-Start* Tabú

---

Procedimiento **MultiStartTabu**(*itermax*; var *S*)

1. Ejecutar TodasFases(1, 1, 1, 1, 1, 0.5, 100, *S*)
2. Hacer:  $frq(i) = 0 \forall i \in V, freq(i, j) = 0 \forall i, j \in V$
3. Ejecutar BTabúModificado(Round(*n*/2), Round(*n*/2), Round(*nlin*/2), 5·*n*, *freq*, *S*)
4. Hacer:  $S^* = S, iter = 1, iterbest = 1$

**Mientras** ( $iter < iterbest + itermax$ ) hacer:

**Inicio**

6. Hacer  $iter = iter + 1$
5. Ejecutar FaseA(1,1,*frq*)
7. Ejecutar FaseB(1,0.5,*freq*)
8. Hacer:  $frq1(s) = 0 \forall s = 0..nlin - 1$

**Repetir** durante 100 iteraciones

**Inicio**

9. Hacer  $AL(s) = 1 \forall s = 0..nlin - 1$
10. Ejecutar FaseD(1,0.5,*frq1*)
11. Hacer:  $frq1(s) = frq1(s) + AL(S) \forall s = 0, \dots, nlin - 1$
12. Actualizar en *S* la mejor solución obtenida (en el bucle Repetir 9-12)

**Fin**

13. Ejecutar BTabúModificado(Round(*n*/2), Round(*n*/2), Round(*nlin*/2), 5·*n*, *freq*, *S*)
  14. Si  $f(S) < f(S^*)$  hacer:  $S^* = S, iterbest = iter$
- Fin**
15.  $S = S^*$
-

Obsérvese que de esta forma, el procedimiento intenta, en cada iteración, (pasos 6-14) empezar en regiones diferentes a las visitadas, intentando favorecer estar en la misma línea. Los pares de estaciones que, durante las ejecuciones de la búsqueda tabú, han estado menos veces en las mismas líneas. Esto se realiza con la ayuda de la matriz *freq*. Por otra parte, una vez que se han diseñado las líneas en diferentes iteraciones (pasos 9-13) se busca la mejor combinación de *AL*, (como en AnalisisFaseD).

A continuación, en la tabla 20, se muestran los resultados obtenidos, en las instancias pseudoreales, tomando el valor del parámetro *itermax* = 3. También se añaden los resultados anteriores de la búsqueda tabú (combinación 1), para una mejor comparación. Se marcan con “\*” las soluciones estrictamente mejores.

**Tabla 20**  
**Comparación de la búsqueda tabú y del *MultiStartTabu***

Instancia #	Búsqueda Tabú	<i>MultiStartTabu</i>
1	31,53969	31,53969
2	26,09744	26,09744
3	27,07663	27,07663
4	37,99000	37,99000
5	37,14667	37,14667
6	29,91497	29,91497
7	35,38942	35,38942
8	36,44717	36,44717
9	29,99167	29,99167
10	34,04533	34,04533
11	32,25416	31,72090 *
12	33,51808	33,25524 *
13	37,43383	37,43383
14	34,25925	34,25925
15	36,51392	36,40818 *
16	38,23006	37,95232 *
17	36,61994	36,50681 *
18	41,99992	41,99992
19	32,11905	31,73952 *
20	32,25407	31,64854 *
21	32,27482	32,27482
22	34,03686	34,02174 *
23	32,59533	32,59533

Instancia #	Búsqueda Tabú	<i>MultiStartTabu</i>
24	33,82018	33,82018
25	32,12507	32,12507
26	31,46654	31,46654
27	33,01347	33,01347
28	31,76766	31,76766
29	31,53607	31,53401 *
30	34,06170	34,06170
31	30,04415	30,03371 *
32	29,89196	29,88977 *
33	29,89196	29,88977 *
34	29,87162	29,87162
35	29,75151	29,75151
36	29,00066	28,98731 *
37	29,57995	29,57995
38	29,57995	29,57995
39	30,04383	30,00680 *
40	29,00532	28,98001 *

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, el procedimiento *MultiStartTabu* sólo mejora a la búsqueda tabú en 15 de las 40 instancias. Quizás esto se deba a que el procedimiento de búsqueda tabú sea lo suficientemente robusto para llegar al óptimo, desde la primera solución inicial (la obtenida por el procedimiento TodasFases) o porque quizás la forma de obtener soluciones iniciales, en regiones no visitadas, no sea el adecuado. En cualquier caso, a pesar de que el número de instancias, donde el procedimiento *MultiStartTabu* supera a la búsqueda tabú, es sólo 15. Dichas 15 instancias pertenecen a los de tipo de mayor tamaño (2, 3 y 4). Concretamente, entre las de tipo 4 (que son las más parecidas a la instancia real), hay seis en donde *MultiStartTabu* supera a la búsqueda tabú. Luego, entendemos que el efecto de reiniciar la búsqueda tabú, en regiones diferentes, sí parece eficaz.

### 6.15 Análisis de las soluciones en la instancia real

A continuación se van a mostrar las soluciones obtenidas por las diferentes estrategias propuestas en la instancia real. Es decir, considerando los datos reales, que se han descrito anteriormente, con todas las estaciones. En este caso,  $n = 45$ ,  $nlin = 5$  y  $nbus = 32$ .

Concretamente, la instancia real se ha ejecutado usando los procedimientos de búsqueda local (BLocal), búsqueda tabú (BTabu) y *MultiStartTabu* (*MSTabu*). Los dos primeros parten de la solución obtenida por el método TodasFases, mientras que la búsqueda tabú usa la combinación 1 de parámetros. Es decir, con las listas tabú más cortas. También se muestra la solución usada actualmente por Metrobús (Actual). A continuación se muestran los resultados. Concretamente, la tabla 21 muestra la descripción de las soluciones, que incluye los autobuses asignados a cada una de las líneas de cada solución línea, el número de estaciones que las componen y la lista de ellas. Aunque el número de líneas es de  $nlin = 5$ , para evitar información innecesaria, se omite la información de las líneas que no tiene asignado autobuses.

**Tabla 21**

**Descripción de las soluciones obtenidas por los diferentes métodos y la solución actual**

Soluciones	Líneas	Buses	nº estac.	Estaciones											
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Actual	1	30	45	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
BLocal	1	16	39	0	1	2	3	6	8	9	11	13	14	15	
				16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
BLocal	2	14	15	0	4	5	7	8	10	12	14	22	27	34	
				37	40	43	44								
BTabu	1	16	39	0	1	2	3	6	8	9	11	13	14	15	
				16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
BTabu	2	14	15	0	4	5	7	8	10	12	14	22	27	34	
				37	40	43	44								
MSTabu	1	13	14	0	4	5	7	8	10	14	22	27	34	37	
				40	43	44									
MSTabu	2	17	41	0	1	2	3	6	8	9	10	11	12	13	
				14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
MSTabu	2	17	41	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33		
				34	35	36	37	38	39	40	41	42	44		

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestra, en la tabla 22, los correspondientes valores de la función objetivo:

**Tabla 22**  
**Función objetivo**

Actual	BLocal/BTabu	<i>MSTabu</i>
35,63304	29,95409	29,94938

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, las soluciones obtenidas por la búsqueda local y por la búsqueda tabú son las mismas. Es decir, en este caso la búsqueda tabú, no supera a la obtenida por la búsqueda local. No obstante, esta solución sí que es superada, aunque muy ligeramente, por la obtenida por el procedimiento *MultiStartTabu*. Ambos hechos son congruentes con lo observado con las instancias pseudoreales (especialmente las de tipo 4). Es decir, no son resultados que llamen la atención de forma especial. En cualquier caso, los resultados de ambas soluciones, la obtenida por la búsqueda local y la obtenida por la búsqueda tabú (BLocal/BTabu), así como la obtenida por el procedimiento *MultiStartTabu* superan claramente a la solución actual (más de cinco minutos y medio de tiempo total de viaje). Es decir, una reducción porcentual del 16%.

Las siguientes pruebas tienen por objeto analizar la robustez de las soluciones obtenidas, así como comprobar que estas mejoras, sobre la solución actual, también son robustas. Hay que tener en cuenta que las soluciones se han obtenido considerando los valores de las demandas medias diarias estimadas (en realidad no es la media muestral, sino el entero más cercano). También, la valoración de la función objetivo está realizada considerando estas demandas medias. Sin embargo, obviamente las diferentes demandas diarias, entre cada par de estaciones, no son un valor constante. Es decir, no tiene porqué tener este valor medio todos los días. Si consideramos la demanda entre dos estaciones concretas, los valores de esta demanda varían siguiendo una distribución (que tiene como valor medio estimado la demanda que estamos considerando). Por tanto, la cuestión que nos planteamos es la siguiente:

¿Si se consideran valores diferentes en las demandas (siguiendo la distribución correspondiente en cada caso), las soluciones que acabamos de obtener (con las demandas medias) mantienen la misma calidad? Es decir ¿Valores similares, en los tiempos totales de viaje? Y otra cuestión relacionada es comprobar si las nuevas soluciones siguen siendo mejores, que la solución actual, con valores diferentes. En definitiva, se trata de comprobar la robustez de las soluciones obtenidas, en cuanto al valor del objetivo considerado (tiempo medio total de viaje) y de las mejoras sobre la solución actual.

Para ello se han generado 1,000 nuevas matrices de demandas (“matrices perturbadas”) de la siguiente forma: para cada par de estaciones se define un intervalo de valores, que toma como valor central la demanda original (el entero más próximo al valor medio) y como radio, el valor entero más próximo a 2.5 veces la desviación típica. Se toma como nueva demanda, un valor entero elegido aleatoriamente, de forma uniforme, entre los enteros de este intervalo. Obviamente, los valores negativos se cambian por un cero. Una vez generadas estas matrices, se ha calculado el valor del tiempo total de viaje (por pasajero), para cada una de estas matrices, en cada una de las dos soluciones obtenidas anteriormente, con las demandas originales (BLocal/BTabu y *MultiStartTabu*) y la solución actual. A continuación, en la tabla 23 se muestran los resultados obtenidos, que incluyen las medias y las desviaciones típicas obtenidos en cada caso.

**Tabla 23**

**Estadísticos con demandas perturbadas**

	Actual	BLocal/BTabu	<i>MSTabu</i>
Media	35,6355588	29,9552232	29,9505854
Std	0,09132387	0,06093997	0,06069658

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede comprobar, los resultados medios (tiempos totales de viaje por pasajero) son prácticamente iguales, que con las demandas originales. Sólo empieza a variar algo, a partir del tercer decimal. Por lo tanto, se mantienen las diferencias entre las diferentes soluciones. Para comprobar si estas diferencias son significativas, se han realizado

diferentes *test* de diferencias de medias (t-student), concretamente uno para cada par de estrategias. En la tabla 24 se muestra el resumen de los resultados de dichos *test*.

**Tabla 24**

**Resultados de los test de diferencia de medias con demandas perturbadas**

	Actual – BLocal/BTabu	Actual – <i>MSTabu</i>	BLocal/BTabu – <i>MSTabu</i>
Media	5,68033564	5,68497343	0,00463779
Std	0,0357572	0,03595291	0,0049128
Error	0,00113074	0,00113693	0,00015536
t-valor	5023,54708	5000,28144	29,8525975
Prob.	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede comprobar, las diferencias son estadísticamente significativas, y con la cola de probabilidad (prácticamente) cero, en todos los casos. Es interesante comprobar que incluso en el tercer *test*, esta diferencia es también significativa, aunque no parece ser especialmente relevante. Finalmente, en la tabla 25 se muestra una matriz que indica cuántas veces (es decir, en cuántas matrices de demandas perturbadas) ha sido mejor cada estrategia, frente a cada una de las otras.

**Tabla 25**

**Número de veces que cada solución supera a cada una de las otras**

	Actual	BLocal/BTabu	<i>MSTabu</i>
Actual	-	0	0
BLocal/BTabu	1000	-	177
<i>MSTabu</i>	1000	823	-

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede comprobar, las dos soluciones propuestas superan en todos los casos a la solución actual. También, por su parte, la solución obtenida por *MultiStartTabu* supera, en la mayoría de los casos, a la obtenida por BLocal/BTabu. Sin embargo, un importante número de casos (casi el 18%) donde la obtenida por BLocal/BTabu, consigue mejores resultados. Esto refleja que, como comentábamos antes, la diferencia entre ambas

soluciones, aunque sea estadísticamente significativa, en la práctica es una diferencia muy relativa y no muy relevante.

## **6.16 Conclusiones del modelo**

En definitiva, tras las pruebas realizadas en las últimas secciones, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- Las características de la Línea 1 del Metrobús, que opera en la Ciudad de México, concretamente en la Avenida de los Insurgentes, hace que sea conveniente dividir la línea correspondiente (que hace parada en todas las estaciones) en más líneas. Estas líneas no paran en todas las estaciones, cada una de ellas, no obstante debe haber estaciones en común, para que sirvan de trasbordo (cambios de líneas) y permitan el traslado entre las diferentes estaciones del corredor. Esto aparentemente podría no parecer no muy lógico inicialmente. Sin embargo, analizando la influencia que tienen las paradas de los vehículos (en las diferentes estaciones) y en los tiempos de trayectos y de espera de la línea se llega a la conclusión de que considerar más de una línea, puede mejorar estos tiempos de viaje y de espera.
- La idea es que aumente la fluidez de las diferentes líneas (al haber menos paradas en cada línea resultante se reducen los tiempos de los trayectos y los tiempos de espera iniciales). También se espera que este aumento en la fluidez de cada línea, compense los tiempos de espera, en los diferentes trasbordos. Esto exige un análisis y diseño adecuado de cada línea.
- Por lo tanto, el modelo que se ha planteado, busca el diseño de varias líneas y la asignación de los vehículos disponibles a cada una de ellas, de forma que se mejoren los tiempos totales de viaje (tiempos de los trayectos y los tiempos de espera) teniendo en cuenta los diferentes datos de los que se dispone.

- Para la resolución de este modelo se han diseñado, implementado y analizado a fondo diferentes técnicas: un algoritmo constructivo (descompuesto en diferentes fases), un procedimiento de búsqueda local, un procedimiento de búsqueda tabú y un procedimiento multiarranque, que combina el algoritmo constructivo con el procedimiento de búsqueda tabú (*MultiStartTabu*).
- Los procedimientos propuestos alcanzan soluciones con más de una línea (dos líneas en cada caso), pero no con todas las estaciones en cada una de ellas. Analizando estas soluciones y comparándolas con la solución actual (donde hay una sola línea, con todas las estaciones) se comprueba, en efecto, que estas nuevas soluciones mejoran de forma relevante y significativa los tiempos totales de viaje por pasajero.
- Además, la calidad de estas soluciones, así como el grado de mejora con respecto a la solución actual, es robusto ante variaciones en las demandas de pasajeros, en las diferentes paradas (obviamente dentro de los márgenes observados).

### **6.17 Apéndice: Solución, representación y cálculo de objetivos**

Como se ha explicado en este capítulo tanto el tiempo total de viaje por persona como otras funciones objetivo (tiempos de espera, número de transbordos) se determinan resolviendo el problema del camino de mínimo coste entre todos los vértices el grafo asociado a cada solución.

Este es una de las grandes dificultades de este trabajo, y la principal limitación de este enfoque. El cálculo del objetivo u objetivos de cada solución visitada o analizada, requiere un tiempo de computación elevado si lo comparamos con otros problemas, ya que para estas funciones objetivos no hay una fórmula explícita que son normalmente fáciles de calcular (como si las hay por ejemplo en los problemas de rutas clásicos donde los objetivos se calculan la como la suma del coste, tiempo o distancia de los arcos que componen cada solución). En nuestro caso hallar las funciones objetivos requiere a su vez

solucionar el problema del camino de mínimo coste (*Shortest Path Problem SPP*) entre los vértices del grafo asociado. Aunque el SPP es un problema polinomial y existen algoritmos eficientes para su resolución, esta lleva mucho más tiempo de computación que el cálculo de las funciones objetivos con fórmula explícita. De hecho se ha valorado que las llamadas a los procedimientos que calculan las funciones objetivo en nuestro problema (algoritmos del SPP) emplean cerca del 95% del tiempo de cálculo (en las instancias de mayor tamaño) en la ejecución los procedimientos BLocal, BTabu y *MSTabu*. En las fases del procedimiento constructivo sólo se calcula las funciones objetivos una vez halladas y por tanto requieren menos tiempo.

Para la resolución del SPP correspondiente se organiza el grafo asociado  $GR = (V, ARC)$ . En nuestro caso, de cara a una más eficiente implementación y ejecución de los algoritmos para el SPP hacemos uso de la forma de organizar esta red que se recomienda en textos como el de Gallo and Pallottino (1988). Para explicar esta forma de organizar definimos  $m$  el número de arcos de  $AR$  y denotaremos este conjunto como  $ARC = \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_{m-1}\}$  para simplificar. A continuación se determinan los subconjuntos  $F(p)$ ,  $\forall p = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ; donde cada  $F(p)$  se define como el conjunto de arcos de  $ARC$  que salen del nodo  $p$ .

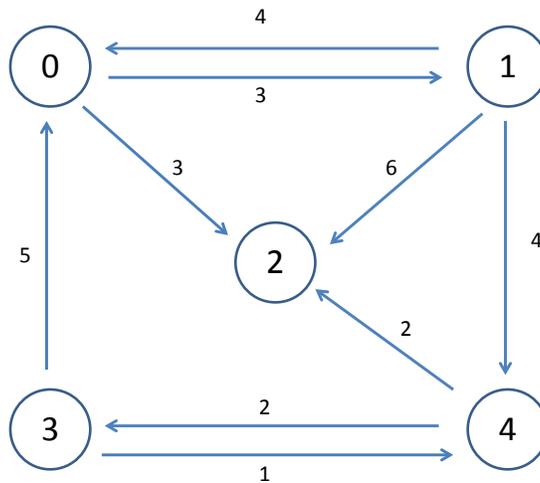
A continuación se ordenan los arcos comenzado con los de  $F(0)$ , después los de  $F(1)$ ,  $F(2)$ ,... y finalmente los de  $F(n-1)$ . En nuestro caso la primera posición es 0 y la última  $m-1$ . Seguidamente se determina  $puntero(p)$  que se define como posición del primer arco de  $F(p)$  según este orden. De esta forma los arcos de  $F(p)$  son los que ocupan las posiciones que van desde  $puntero(p)$  a  $puntero(p+1)-1$ . Obviamente  $puntero(0) = 0$ . Además se añade un valor auxiliar  $puntero(n) = m$ .

Posteriormente se definen tantos vectores como sean necesarios para definir las características de cada arco siguiendo este orden. En nuestro caso nodo final, y los valores de  $cst^1$  y  $cst^2$ . Obsérvese que el nodo inicial ya viene definido implícitamente por los valores del vector  $puntero$  y  $cst$  se calcula como suma de  $cst^1$  y  $cst^2$ .

De esta forma en nuestro caso el grafo  $GR$  requiere un espacio de memoria de  $3 \cdot m + n + 1$  espacios de memoria. Para ilustra esta forma de organizar y registrar un grafo considérese el ejemplo de la figura 1. Se muestra un grafo de 5 nodos y 9 arcos, para simplificar consideramos sólo un parámetro ( $cst$ ) en cada arco.

**Figura 22**

**Ejemplo sencillo de un grafo dirigido con 5 nodos y 9 arcos**

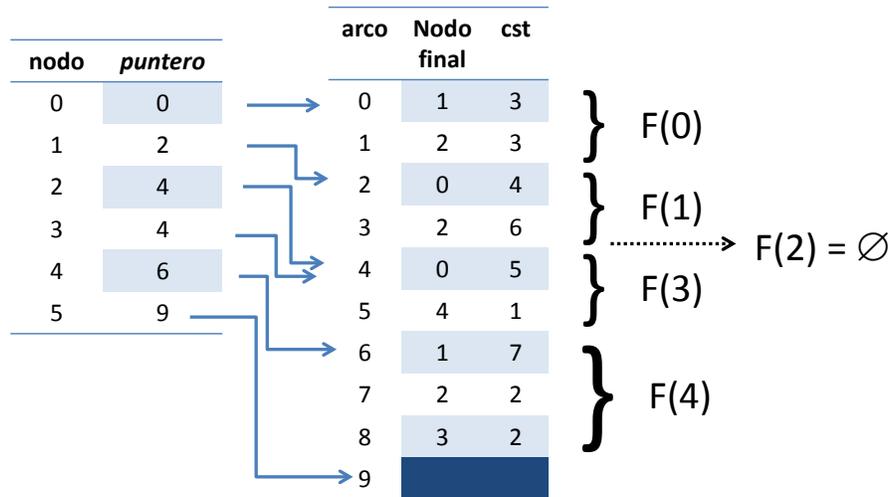


Fuente: Elaboración propia.

Este grafo se puede organizar como un vector de  $6(n+1)$  elementos y dos vectores de  $9(m)$  elementos como se ilustra en la figura 23 de la siguiente página:

**Figura 23**

**Representación del grafo anterior como un vector de 6 elementos (*puntero*) y 2 de 9 elementos (*Nodos final* y *cst*)**



En nuestro caso el vector *cst* se sustituiría por los correspondientes  $cst^1$  y  $cst^2$ . El proceso para organizar un grafo *GR* es de  $\theta(m)$  operaciones. Ahora bien dada las características del grafo *GR* el número de arcos *m* puede ser del orden de  $\theta(nlin \cdot n^2)$  elementos (todos los posibles pares de estaciones en cada una de las líneas a considerar). Para evitar tiempos de cálculo excesivos en este proceso de determinar los vectores asociados al grafo *GR* cada vez que se visita o analiza una solución, se considera la siguiente estrategia: Se va a definir un grafo genérico  $GRG = (V, ARCG)$  con todos los arcos potenciales que puede disponer, es decir, los arcos formados por todos los pares de estaciones para cada una de las líneas. Más concretamente el conjunto *ARCG* estará definido como  $ARCG = \{ \text{arc} = (p, q, h) : p, q \in V, p < q, h = 0, \dots, nlin-1 \}$ . Este grafo se define y se organiza en forma de vectores, como se acaba de describir al iniciar todo los procesos de búsqueda (BLocal o BTabu). En cada caso lo que varían son los valores de  $cst^1$  y  $cst^2$  de cada arco según sea la solución visitada o analizada. De forma que si un arco no está en la solución los valores correspondientes de  $cst^1$  y  $cst^2$  serán de  $cst^1 = cst^2 = \infty$ , y en la resolución del correspondiente SPP este arco no será elegido. Por ejemplo en una solución con la siguiente semi-línea:

los arcos (0 , 2), (1, 2), (2,3), (2,4), (2,5) (0, 4), (1, 4), (3, 4) y (4, 5) no están en la red, (omitimos el índice la semi-línea para simplificar) y por tanto  $cst^1_{02} = cst^2_{02} = \infty$ ,  $cst^1_{12} = cst^2_{12} = \infty, \dots$

En un proceso de búsqueda vecinal (local o tabú) cuando se está analizando el vecindario de una solución solo hace falta actualizar los valores de los arcos que se añaden o quitan. Por ejemplo en el caso anterior, si se analiza la solución vecina que consiste en añadir la parada 4 en esta semi-línea habrá que actualizar los valores de  $cst^1$  y  $cst^2$  para (0, 4), (1, 4), (3, 4) y (4, 5).

Una vez organizado el grafo y registrada en forma de vectores, se ejecuta un procedimiento para resolver el SPP. En nuestro caso hacemos uso del clásico algoritmos de Djisktra (1959) pero con una estructura de árbol binario para seleccionar el nodo que se etiqueta. Los métodos de ordenamiento en árboles binarios fueron propuestos en el trabajo Williams (1964). Tanto el método resultante de combinar el algoritmo de Djisktra con árboles binarios como otros métodos son analizados con detalle en el trabajo de Gallo and Pallottino (1988) antes mencionado.

**CAPITULO 7:**  
**ENFOQUE MULTI OBJETIVO: ANÁLISIS Y**  
**DISEÑO DE MÉTODOS DE SOLUCIÓN**



## 7.1 Introducción

Como se ha comentado en capítulos anteriores en el modelo que se está analizando en este trabajo se pueden considerar varios objetivos: algunos están relacionados con el nivel de servicio (tiempo total de transporte, tiempos de espera, trasbordos), otros con los costes (coste por combustible consumido, autobuses usados), otros incluso con aspectos ecológicos (emisiones) o laborales (planificación de turnos de trabajo de los conductores).

Centrándonos en los objetivos que se relacionan con el nivel de servicio se han considerado inicialmente tres: el tiempo total de viaje, el tiempo de espera y el número de trasbordos (en todos los casos son valores medios por pasajero).

El tiempo de espera forma parte del tiempo total de viaje (definido como tiempo de espera más el tiempo de viaje propiamente dicho). No obstante siempre se aprecia peor por parte de los usuarios este tiempo de espera que el tiempo de viaje propiamente dicho. Hay varios autores que han analizado estas dos componentes de forma separada, aunque al final en la mayoría de los casos se han agregado, aunque sea con diferentes pesos. Concretamente en Pacheco, et al (2009) se dan diferentes pesos al tiempo de espera (1, 2, 5, 10, 100 y 1000) en un modelo similar de transporte urbano.

Los transbordos son otra medida del nivel de calidad. Como ocurre con el tiempo de espera, un número de trasbordos alto tampoco está bien percibido aunque el tiempo total de viaje sea pequeño. En este caso entendemos que un número de trasbordos alto se aprecia aún peor que el tiempo de espera. Pensemos en la incomodidad de movernos de nuestro asiento del autobús, bajar, esperar al siguiente autobús, subirnos en él y buscar asiento. En este sentido personas con ciertas dificultades para moverse (no necesariamente incapacitadas) por ejemplo personas de cierta edad, cada transbordo supone una relativa gran incomodidad y pueden preferir no realizar ninguno aunque el tiempo total del viaje vaya a ser más alto. También puede pasar lo mismo con personas que están de vacaciones o que sencillamente no realicen el viaje por razones laborales sino por ocio (turismo, reunión con familiares o amigos), es decir actividades que no exigen una excesiva puntualidad. En estos casos el

tiempo total de viaje quizás no sea relevante. En el lado contrario para personas jóvenes o sencillamente con buena movilidad el número de trasbordos no sea tan relevante. En este sentido personas que realicen el viaje por razones laborales (trabajadores, estudiantes) o no relacionados con el ocio (visitas a médicos, realización de ciertas gestiones) quizás estén más interesadas en tiempos totales de viaje cortos ya que son actividades que si exigen puntualidad.

En definitiva, el tiempo total de viaje y el número de trasbordos son dos medidas importantes de la calidad del servicio. Por otra parte son funciones que pueden entrar en conflicto: En efecto en el capítulo anterior vimos como al dividir la línea del corredor en varias líneas con paradas diferentes, se reducía el tiempo total de viaje. No obstante esta división produce obviamente que haya trasbordos. Finalmente son muy difícilmente agregables ya que el peso que se puede dar a cada una de ellas depende del sector de la población que use el servicio como se ha reflexionado en el párrafo anterior.

Por tanto entendemos que abordar el problema del diseño de líneas y asignación de autobuses, como en el capítulo anterior, pero considerando estos dos objetivos (en vez de uno) puede ser un planteamiento interesante. La curva de eficiencia obtenida (o su aproximación) puede ser una fuente de información importante para las autoridades a la hora de confeccionar las líneas. Sobre todo si se puede analizar a través de estudios o encuestas que tipo de usuarios mayoritariamente usa el servicio en cada periodo del año. En este sentido, quizás uno pueda pensar que en períodos no lectivos (vacaciones de verano o navidades) puedan ser mejores las soluciones que favorezcan la reducción del número de trasbordos, mientras que en periodos lectivos sean mejor las soluciones que reduzcan el tiempo total de viaje. En cualquier caso es claro que tanto el conjunto de soluciones que constituyen la curva de eficiencia como estudios y análisis de los usuarios del servicio pueden ayudar a tomar las decisiones más convenientes.

En este capítulo se diseña, por tanto, un método de solución para el modelo analizado en el capítulo anterior pero considerando estos dos objetivos: Tiempo Total de Viaje ( $f_1$ ) y Número de trasbordos ( $f_2$ ). Hay que hacer notar que en el capítulo anterior denotábamos el

Tiempo Total de Viaje con  $f$ . Esto se tiene que tener en cuenta cuando hagamos referencia a procedimientos del capítulo anterior (valdrá con cambiar  $f$  por la función objetivo correspondiente para su correcta descripción).

## 7.2 Notaciones y definiciones

Además de la notación usada en capítulos anteriores en este se va a añadir las siguientes definiciones y notaciones. Inicialmente se recuerda los conceptos de dominancia y eficiencia para este problema. Sean  $S$  y  $S'$  dos soluciones, se dice que  $S$  domina a  $S'$  si:

- a)  $f_1(S) \leq f_1(S')$
- b)  $f_2(S) \leq f_2(S')$  y
- c)  $f_1(S) < f_1(S')$  o bien  $f_2(S) < f_2(S')$

Una solución es eficiente si no existe otra que la domina. El problema que aquí se plantea consiste en encontrar soluciones lo más cercanas posibles al conjunto de soluciones eficientes del problema que se denomina “curva de eficiencia”. Se definen:

- $f_1^{\min}$  y  $f_1^{\max}$  como el mínimo y máximo valor encontrado para  $f_1$  en el conjunto de soluciones no dominadas.
- $f_2^{\min}$  y  $f_2^{\max}$  como el mínimo y máximo valor encontrado para  $f_2$  en el conjunto de soluciones no dominadas.
- $F_\lambda(S) = \max \left\{ \lambda \cdot \frac{f_1(S) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}}, (1 - \lambda) \cdot \frac{f_2(S) - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \right\}$ , donde  $\lambda \in (0,1)$ .

## 7.3 Estrategia para el modelo biobjetivo

La estrategia que se propone en este trabajo para resolver este modelo biobjetivo, es una adaptación del procedimiento MOAMP (*MultiObjectiveAdaptativeMemoryProcedure*) para problemas multiobjetivo. Este procedimiento crea, básicamente, una aproximación a la curva de eficiencia, enlazando la ejecución de una serie de procedimientos de búsqueda

tabú, es decir, procedimientos que utilizan como solución inicial, la solución final obtenida en la ejecución anterior. Posteriormente, se realiza una exploración en torno a las soluciones obtenidas hasta ese momento.

Las ideas en las que se basa MOAMP son:

- El principio de proximidad de puntos eficientes, según el cual, en un entorno o vecindario de una solución eficiente, se puede encontrar otra solución eficiente.
- Las solución que minimiza la distancia  $L_\infty$  normalizada y/o ponderada al punto ideal es también eficiente.

Obsérvese que, precisamente la función  $F_\lambda$  definida en el epígrafe 6.1 representa esta distancia ponderada por  $\lambda$  y  $1-\lambda$ . Se ha observado que las soluciones que minimizan  $F_\lambda$  son también eficientes.

Se va a denotar por  $Set\_ND$  el conjunto de soluciones no dominadas encontradas durante la búsqueda. El conjunto  $Set\_ND$  final será la aproximación a la curva de eficiencia obtenida. La estrategia de solución tiene las tres fases siguientes:

### Seudocódigo 13.- Fase I del procedimiento MOAMP

---

#### FASE I

1. Hacer  $S$  la solución con una sola línea con todas las paradas y todos los autobuses asignados a ella.
  2. Hacer  $Set\_ND = \{ S \}$ .
  3. Ejecutar **BTabu**( $S$ ), tomando  $f_1$  como función objetivo ( $f_2 \rightarrow f_1$ )
  4. Ejecutar **MultiStarTabu**( $S$ ) para obtener una solución  $S$  minimizando el tiempo total de viaje ( $f_1$ ).
  5. Ejecutar **BTabu**( $S$ ), tomando  $f_1$  como función objetivo ( $f_1 \rightarrow f_2$ )
  6. Actualizar  $Set\_ND$  con las soluciones visitadas en los pasos 3, 4 y 5
-

## Seudocódigo 14.- Fase II del procedimiento MOAMP

---

### FASE II

#### Repetir

7. Generar  $\lambda \in (0,1)$  aleatoriamente.
  8. Ejecutar **BTabu**( $S$ ), usando  $F_\lambda$  como función objetivo.
  9. Actualizar  $Set\_ND$  con las soluciones visitadas en el paso 8
- hasta** que trascurren  $max\_iter\_faseii$  iteraciones sin cambios en  $Set\_ND$
- 

## Seudocódigo 15.- Fase III del procedimiento MOAMP

---

### FASE III

#### Repetir

10. Identificar las soluciones  $S$  de  $Set\_ND$  cuyos vecindarios no han sido explorados (todas en la primera iteración)
  11. Para cada una de estas soluciones  $S$  explorar sus vecindarios y actualizar  $Set\_ND$  con cada solución vecina suya.
  12. Identificar las nuevas soluciones de  $Set\_ND$  y mejorarlas
- hasta**  $Set\_ND$  se estabilice (no cambie)
- 

Con la primera fase se quieren obtener las mejores soluciones con respecto a cada una de las funciones objetivos originales. Si se observa la solución obtenida en el paso 1 es el óptimo con respecto a  $f_2$  ya que va a suponer que no haya ningún trasbordo. Por tanto los valores de  $f_1(S)$  y  $f_2(S)$  en este caso se corresponden con  $f_2^{\min}$  y  $f_1^{\max}$ . En el paso 4 se intenta obtener el otro extremo, el óptimo con respecto a  $f_1$ , y por tanto los valores de  $f_1^{\min}$  y  $f_2^{\max}$ . Sin embargo en este caso no se tiene la garantía que  $S$  sea necesariamente el óptimo con respecto a  $f_1$  sino un una buena aproximación. Incluso a veces estas aproximaciones son mejoradas en fases posteriores. Por tanto, en la descripción del método general,  $f_1^{\min}$  y  $f_2^{\max}$  se re-definen respectivamente como los valores de la mejor solución con respecto a  $f_1$

de  $Set\_ND$ .

Por otra parte hay que hacer notar que en la mención de los procedimientos BTabu y *MultiStartTabu* se ha omitido la definición de los parámetros de entrada usados para simplificar. En el caso de BTabu se usa los parámetros que mejor resultado dieron en el capítulo anterior es decir  $TenureIn = TenureOut = Round(n/2)$  y  $TenureBus = Round(nlin/2)$ ; en el caso de *MultiStartTabu* se toma  $itermax = 3$ .

En la segunda fase, se obtiene una muestra diversa de soluciones “de compromiso”; es decir, no las mejores soluciones con respecto a algún objetivo concreto, pero sí buenas soluciones en conjunto. Esta fase finaliza cuando transcurre un cierto número de iteraciones ( $max\_iter\_faseii$ ) sin cambios en  $Set\_ND$ . Como se indica en los pasos 6 y 9 el conjunto de soluciones no dominadas  $Set\_ND$  se actualiza con todas las soluciones visitadas durante cada ejecución de la búsqueda tabú (es decir BTabu en los pasos 3, 5 y 8 y BTabúModificado dentro de *MultiStartTabu* en el paso 4) en estas dos primeras fases. Para ello vale cambiar ligeramente el paso 8 de los procedimientos BTabu y BTabúModificado como sigue:

8. Hacer  $S = S_1$  y actualizar  $Set\_ND$  con  $S$ .

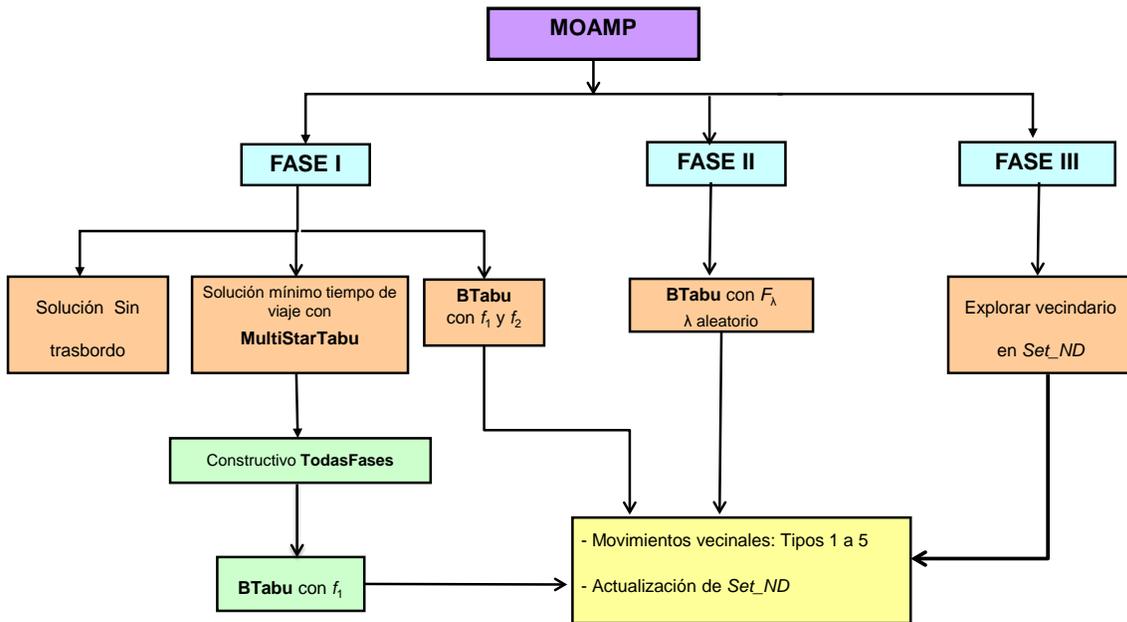
La actualización del conjunto  $Set\_ND$  con una solución  $S$  consiste en los siguientes pasos:

- a) Comprobar si  $S$  está dominada por alguna solución de  $Set\_ND$ ;
- b) Si  $S$  no está dominada por ninguna solución de  $Set\_ND$  entonces:
  - b1. Hacer  $Set\_ND = Set\_ND \cup \{ S \}$
  - b2. Eliminar de  $Set\_ND$  las soluciones dominadas por  $S$

Finalmente, en la tercera fase se completa el conjunto de soluciones no dominadas explorando el vecindario de las encontradas hasta ese momento. El vecindario de cada solución  $S$  es el mismo que el definido en el capítulo anterior, (es decir  $N(S)$ ). El siguiente diagrama muestra la jerarquía de procedimientos de la estrategia de solución (MOAMP):

Figura 22

Esquema de funcionamiento de MOAMP



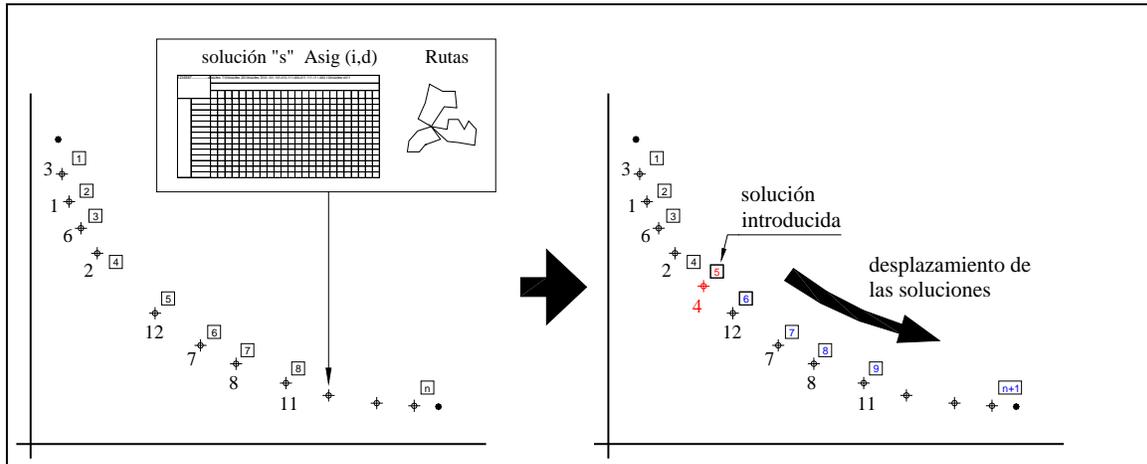
Fuente: Elaboración propia.

7.4 Aceleración: Movimiento por índices

La inclusión de una solución determinada, en el conjunto de soluciones no dominadas, obliga a “mover” una posición de memoria todo el resto de soluciones que la siguen; esta situación también se da en el caso de que, por incluir una solución, aparezcan soluciones que antes eran no dominadas, pero que ahora sí lo son y que, por tanto, deben desaparecer de dicho conjunto. Sabiendo que cada solución  $S$  tiene dos componentes  $ST$ , conjunto de líneas (con las paradas que componen cada una de ellas), y  $AL$  asignación de autobuses a cada una de estas líneas, se intuye que este proceso presenta un tiempo de cómputo muy alto. En esta sección se analizará este problema con detalle y se describirá la adaptación para nuestro problema del método propuesto en el trabajo de Gómez (2010) para reducir este tiempo de computación en las actualizaciones del conjunto de soluciones no dominadas en un problema similar.

Figura 23

Ejemplo de inserción de una solución no dominada



Fuente: Gómez, 2010.

Como se puede observar en la figura 23, al insertar la solución 4, se provoca un desplazamiento de las soluciones siguientes (en azul) de la celda de memoria que ocupaba (identificada mediante un índice), a otra celda de memoria. Este desplazamiento consume gran cantidad de tiempo. Así mismo, la introducción de una solución puede provocar la salida del conjunto de soluciones no dominadas, de uno o más puntos, por pasar a estar dominados; en este caso, también se produce un desplazamiento de soluciones al ocupar éstas, los espacios de memoria, ahora vacíos.

A fin de tratar de aumentar la rapidez de este proceso se diseña una estrategia basada en una idea sencilla: cuando entra una solución en el conjunto de soluciones no dominadas se le asocia un índice de forma permanente mientras este en *Set<sub>ND</sub>*. De esta forma en los movimientos implicados en la actualización de *Set<sub>ND</sub>* no se mueven las soluciones sino los correspondientes índices. Así la figura 24 se ilustra un ejemplo de inserción de una solución nueva. En este caso, podemos suponer que las soluciones están ordenadas según el tiempo total de viaje ( $f_1$ ), es decir  $f_1(S_1) < f_1(S_2) < f_1(S_3) < \dots < f_1(S_{11})$ . Para incluir una nueva solución no dominada  $S_{12}$  entre  $S_5$  y  $S_6$  (por tanto verificando que  $f_1(S_5) < f_1(S_{12}) < f_1(S_6)$ ) asociamos un índice nuevo o “libre” (12) e insertamos este índice entre los índices 5 y 6.

**Figura 24**

**Ejemplo de inserción de una solución no dominada**

Ind	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sol	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$



Ind	1	2	3	4	5	12	6	7	8	9	10	11
Sol	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_{12}$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma la expulsión de soluciones, dominadas por  $S_{12}$ , provoca la “liberación” de los índices correspondientes y el desplazamiento de los índices correspondientes a las soluciones que iban a continuación. La figura 25 ilustra este proceso. Supongamos, siguiendo el ejemplo anterior que  $f_2(S_{12}) < f_2(S_6)$  y  $f_2(S_{12}) < f_2(S_7)$ . Esto implica que  $S_6$  y  $S_7$  están dominadas por  $S_{12}$  y por tanto son eliminadas. Para ello se liberan los índices correspondientes (6 y 7) y se desplazan los índices de las soluciones siguientes como se ilustra en la figura 25.

**Figura 25**

**Ejemplo de eliminación de dos soluciones no dominadas**

Ind	1	2	3	4	5	12	6	7	8	9	10	11
Sol	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_{12}$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$



Ind	1	2	3	4	5	12	8	9	10	11
Sol	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_{12}$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto la idea de esta estrategia es no las soluciones sino los índices correspondientes. Además, para aumentar la eficacia se precisa de una gestión adecuada de los índices. Para

ello inicialmente se genera una lista (figura 26) con todos los índices disponibles:  $1, 2, \dots, p$  (donde  $p$  puede ser una cota superior del número máximo de soluciones que puede contener  $Set\_ND$ ).

**Figura 26**

**Lista inicial de índices**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

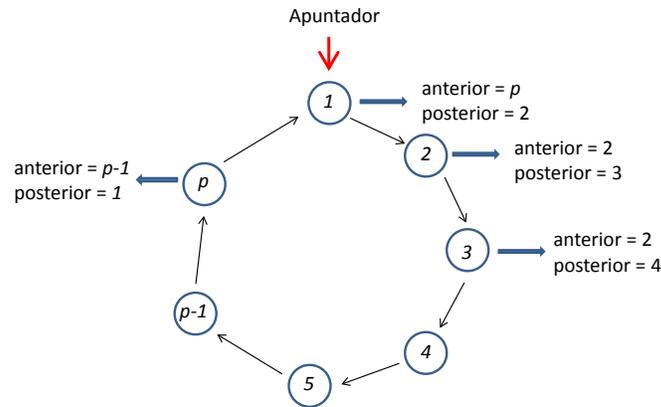
Fuente: Elaboración propia.

Esta gestión debe ocuparse tanto del conjunto de índices libres (no asociados a ninguna solución), como del conjunto de índices ocupados, (es decir asociados a soluciones que forman parte del  $Set\_ND$ ). Estos dos conjuntos se organizan en forma de dos anillos (uno con el de índices libres y otro con del de índices ocupados). Inicialmente todos los índices están libres con lo cual el anillo de los índices libres está compuesto por todos los índices y el de índices ocupados está vacío.

A cada índice se le asocian dos atributos que indican respectivamente el índice anterior (“anterior”) y el índice posterior (“posterior”) en su anillo correspondiente (figura 27). Además se define una variable “apuntador” que apunta al primer índice libre, que inicialmente es el  $1$ .

**Figura 27**

**Anillo inicial de índices disponibles con sus atributos (anterior y posterior)**

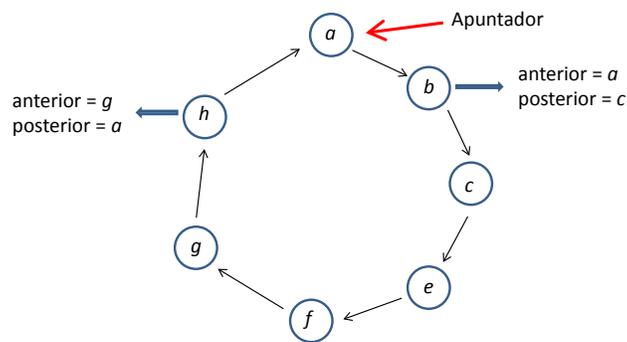


Fuente: Elaboración propia.

Cuando una solución entra en el conjunto de soluciones no dominadas se le asocia el primer índice libre (indicado por el apuntador). Este índice sale del anillo de índices libre. La figuras 28 y 29 muestran un ejemplo donde el índice  $a$  es el primer índice libre (figura 28) y al asociarle una nueva solución no dominada sale del anillo de sale de índices libres (figura 29).

**Figura 28**

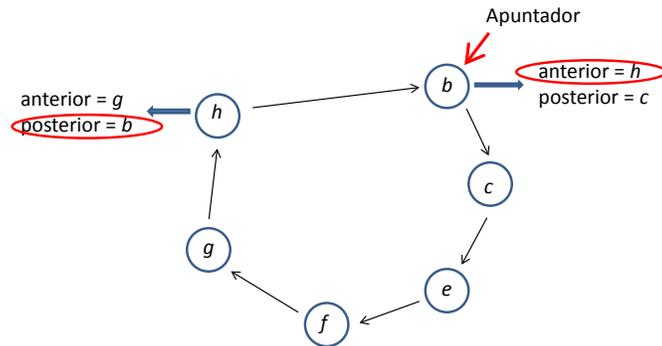
**Anillo de índices libres antes de asociar al índice  $a$  a una nueva solución no dominada**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 29**

**Anillo de índices libres tras eliminar el índice *a***

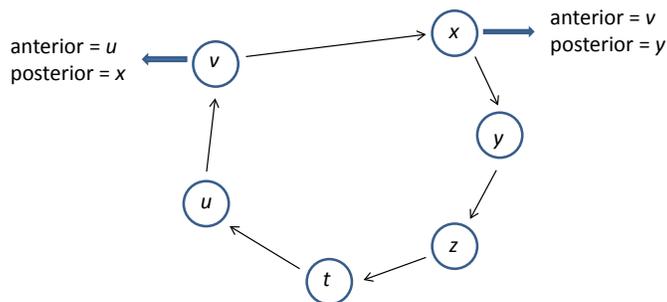


Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo este mismo ejemplo, a continuación el índice *a* pasa a formar parte del anillo de índices ocupados. Las figuras 30 y 31 muestran los elementos del anillo de índices ocupados antes y después de la entrada del índice *a*.

**Figura 30**

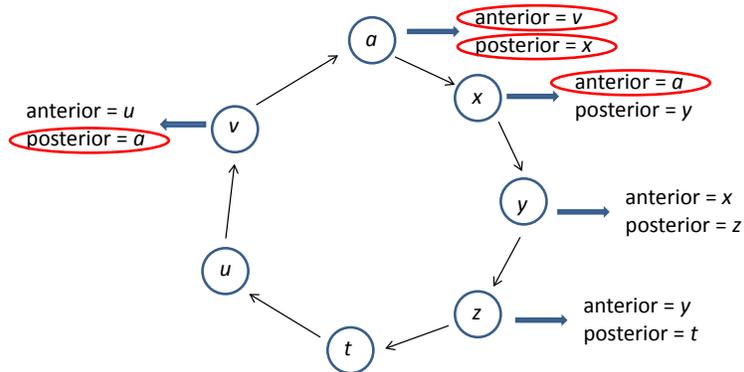
**Anillos de índices ocupados antes de la entrada del índice *a***



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 31**

**Anillos de índices ocupados tras la entrada del índice  $a$**



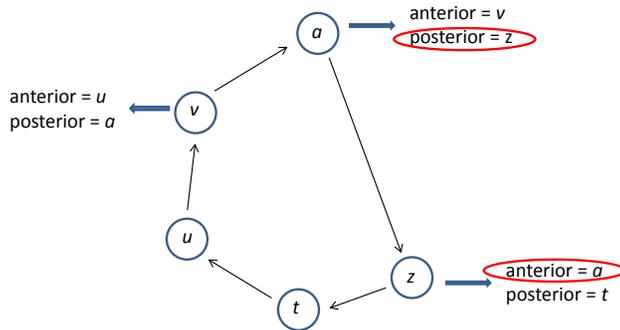
Fuente: Elaboración propia.

Como se ha comentado antes, la nueva solución que entra en  $Set_{ND}$  puede dominar a una a o varias soluciones de este conjunto (que en su caso deben estar todas seguidas y a continuación de la nueva solución, según se ha razonado antes) y por tanto deben ser eliminadas del mismo. Luego los índices asociados a estas soluciones que van a ser eliminadas deben ser “liberados” o en otras palabras, abandonar el anillo de índices ocupados e incorporarse al anillo de índices libres. Siguiendo el ejemplo anterior supóngase que la nueva solución (la que lleva asociada el índice  $a$ ) domina a sus dos siguientes soluciones de  $Set_{ND}$ . Los dos índices correspondientes  $x$  e  $y$  deben abandonar el anillo de índices ocupados e insertarse en el de libres (en la parte final).

Las figuras 32 y 33 muestran respectivamente el anillo de soluciones ocupadas tras eliminar los índices  $x$  e  $y$ , y el anillo de soluciones libres tras insertarlos.

**Figura 32**

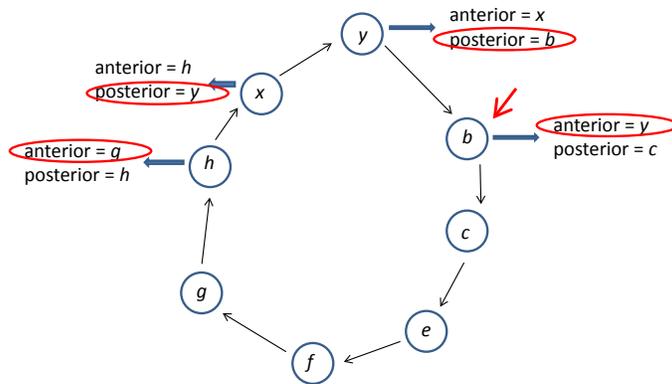
**Anillo de índices ocupado tras eliminar los índices  $x$  e  $y$**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 33**

**Anillo de índices libres tras insertar los índices  $x$  e  $y$**



Fuente: Elaboración propia.

Obsérvese que los índices que componen cada anillo y el orden en cada uno de ellos quedan definidos implícita y perfectamente por los atributos “anterior” y “posterior”. Por tanto la redefinición adecuada de estos atributos permite la actualización de estos anillos, es decir, las operaciones de eliminación e inserción en cada uno de ellos. En el ejemplo anterior, que se ha diseñado sin pérdida de generalidad, se puede observar que las operaciones realizadas en los anillos de índices, al actualizar el conjunto  $Set\_ND$  con una nueva solución, suponen a lo sumo 12 sentencias sencillas (las 12 reasignaciones de los valores de los atributos anterior y posterior que viene marcadas por un círculo rojo). Por tanto este número de sentencias, no depende del tamaño del conjunto de soluciones dominadas  $Set\_ND$ , ni del espacio de memoria de cada solución. La única operación en la actualización de  $Set\_ND$

con esta estrategia que depende del tamaño de *Set\_ND* es la búsqueda de la posición que ocupa la nueva solución en *Set\_ND*, y por tanto la posición que ocupa el índice asociada en el anillo de índices ocupado (en el ejemplo anterior *a*).

En definitiva esta estrategia sirve para actualizar el conjunto de soluciones no dominadas de forma eficiente sin depender del espacio de memoria ocupado por cada solución (al mover índices y no soluciones), y dependiendo de forma muy limitada y lineal del tamaño de este conjunto. De hecho esta estrategia ha mostrado funcionar muy bien en otros trabajos de modelos biobjetivos con estructuras de solución muy pesadas y de gran tamaño en el conjunto de soluciones no dominadas, (por ejemplo, Gómez 2010).

### **7.5 Algoritmo NSGA II: Conceptos iniciales**

Con el fin de poder examinar la ‘bondad’ de los resultados obtenidos por el algoritmo diseñado para la resolución de este problema, se van a comparar los mismos con los resultados obtenidos por una adaptación del conocido NSGA II.

Este algoritmo genético ha demostrado obtener buenos resultados en gran cantidad de problemas multiobjetivo en los últimos años, por lo que se considera que la comparación con él puede dar una buena medida sobre la calidad del algoritmo aquí propuesto. Encuadrado dentro de los algoritmos evolutivos, se inspira en modelos evolutivos propios de la naturaleza (Holland, 1975).

Desciende del algoritmo NSGA que se basa en la clasificación de puntos en función de su no-dominación, antes de seleccionar a los individuos. Según esto, a todos los puntos no dominados, se les asigna un mismo valor de aptitud, dependiente del tamaño de la población. Tras la conclusión del proceso, todos los puntos quedan clasificados, teniendo mayor posibilidad de reproducirse aquellos con mejor clasificación.

Como se indica en Deb, et al. (2002), NSGA presenta los siguientes inconvenientes:

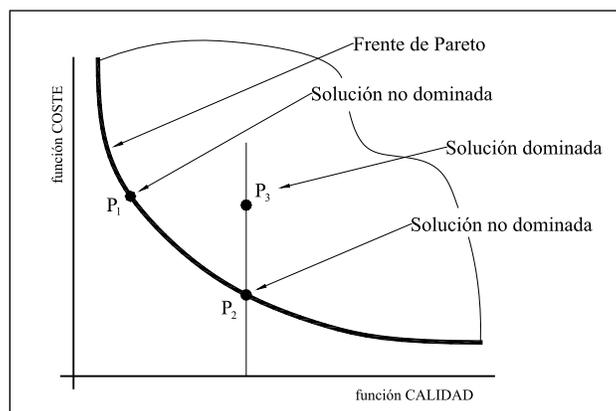
- Elevada complejidad computacional.
- Falta de elitismo.
- La falta de un operador de selección.

El algoritmo NSGA II alivia estas limitaciones, principalmente la relacionada con el orden de complejidad, puesto que pasa a tener un orden de complejidad inferior; también, la presencia de un operador de comparación que crea un conjunto cruzado por combinación de poblaciones de padres y descendientes y que selecciona a los mejores (según su *fitness*).

Un concepto importante, como indican Correa et al. (2008), es el de “dominancia”, derivado del orden de Pareto, ya citado, que ayuda a la hora de clasificar las diferentes soluciones, teniendo en cuenta la presencia y cuantificación de los diferentes objetivos.

El concepto de “dominancia” se puede utilizar para encontrar un conjunto de soluciones no dominadas, dentro de una población; el conjunto de todas estas soluciones no dominadas, conforman lo que se denomina un *Frente de Pareto*, es decir, soluciones no dominadas entre sí, pero que dominan al resto de soluciones (figura 34).

**Figura 34**  
**Frente óptimo de Pareto**



Fuente: Gómez, 2010.

Pueden existir diferentes niveles de no dominancia. Al ejecutar el algoritmo anterior por primera vez, se obtiene un conjunto de soluciones no dominadas de mejor nivel, para obtener segundos niveles de no dominancia, se pueden omitir temporalmente las soluciones inicialmente obtenidas (las de mejor nivel) y así sucesivamente, hasta clasificar todas las soluciones dentro de un nivel o frente de Pareto, es decir:

- $F_1$ : Conjunto de soluciones no dominadas de  $P$ .
- $F_2$ : Conjunto de soluciones no dominadas de  $P-F_1$ .
- $F_3$ : Conjunto de soluciones no dominadas de  $P-\{F_1 \cup F_2\}$ .

y así sucesivamente.

A fin de mejorar el proceso de búsqueda de soluciones no dominadas, se desarrolla el algoritmo NSGA II.

## 7.6 Descripción de algoritmo NSGA II

Propuesto por Deb y sus alumnos, es más eficiente, usa elitismo y un operador de comparación (*crowding*) en función de la proximidad entre sí de las diferentes soluciones.

En este algoritmo, la población descendiente  $Q$  (tamaño  $N$ ) es creada a partir de la población de los padres  $P$  (tamaño  $N$ ). A continuación, ambas poblaciones se combinan, creando una nueva población  $H$  de tamaño  $2N$ ; después, se procede a un ordenamiento no dominado, clasificando la población  $H$  en diferentes frentes de Pareto. Terminado este proceso, la nueva población se configura a partir de las soluciones del mejor frente no dominado y así sucesivamente. La población inicial puede ser generada por métodos aleatorios o mediante alguna técnica de inicialización.

Al ser  $N$  el tamaño de la población y, dado que en el caso del primer cruce, se genera una población  $R$  de tamaño  $2N$ , no todas las soluciones de los diferentes frentes de las poblaciones descendientes podrán tener encaje en la nueva población, por lo que tendrán

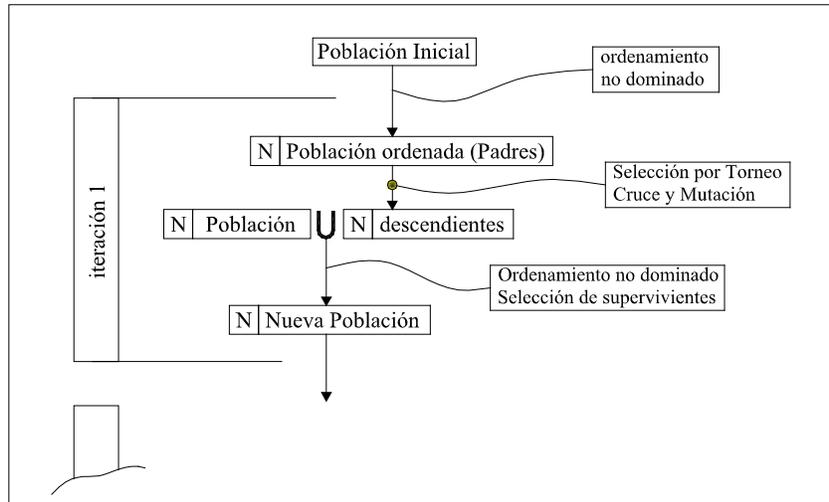
que ser eliminadas.

Puede ocurrir que, cuando se consideren soluciones del último frente de Pareto, las soluciones, que pertenezcan a éste, excedan a las restantes para completar el conjunto de la población descendiente. En este caso, es interesante definir alguna estrategia que permita elegir soluciones que estén en zonas poco pobladas a fin de presentar un frente más amplio, frente a una elección aleatoria de soluciones descendientes. Para favorecer esta idea, se introduce el concepto de ordenamiento no dominado que ordena las soluciones según un parámetro (definido más adelante) prefiriendo, dentro de un mismo frente de Pareto, soluciones ‘más aisladas’ frente a soluciones ‘menos aisladas’ a fin de incentivar la diversidad de las mismas.

Lo anteriormente citado suele ser poco relevante en las primeras iteraciones, ya que hay muchos frentes que sobreviven; ahora bien, según avanza el proceso, hay soluciones que pasan al primer frente, con lo que pueden exceder el número máximo de individuos. Esta cuestión es de vital importancia, por cuanto hay que procurar que las soluciones no rechazadas sean de buena calidad y, a la vez, presentar una adecuada diversidad. Tal y como se configura el algoritmo, cuando todas las soluciones convergen a un frente de Pareto óptimo, se garantiza que las soluciones están distanciadas unas de otras.

Como se puede observar en la figura 35, inicialmente se crea una población (aleatoria o mediante alguna técnica constructiva). Dicha población se ordena según niveles de no dominancia y se le asigna un *fitness* según dicho nivel. El cruce, la mutación y la selección por torneo se emplean en la creación de la población descendiente. Los principales pasos del algoritmo se describen en dicha figura. Obsérvese que en cada iteración (o generación) las soluciones de la población se ordenan con el ordenamiento no dominado. Para seleccionar las  $N$  “padres” se toman aleatoriamente  $2 \cdot N$  elementos de la población (obviamente con reemplazamiento). De estos  $2 \cdot N$  elementos se obtiene los  $N$  padres por “torneo”, es decir se forman  $N$  parejas y de cada pareja se elige el mejor individuo según el orden que se ha establecido. Una vez se han seleccionado los  $N$  padres, estos forma  $N/2$  parejas. De cada una de ellas se obtendrán dos individuos mediante cruce y mutación.

**Figura 35**  
**NSGA II. Esquema de funcionamiento**



Fuente: Gómez, 2010

### 7.7 El ordenamiento no dominado

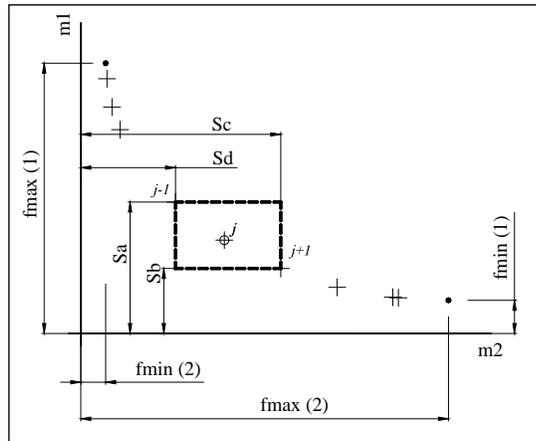
Para explicar con más detalle el ordenamiento no dominado se define:

$ind(S)$  : índice de la capa de no-dominancia a la que pertenece  $S$ ;

$$cwnd\_dst(S) = \frac{f_1(S_a) - f_1(S_b)}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \frac{f_2(S_c) - f_2(S_d)}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (\text{crowding distance de } S);$$

donde  $S_a$  y  $S_b$  son las soluciones justo anterior y posterior a  $S$  al ordenar su capa de no-dominancia ( $F_{ind(S)}$  según los valores de  $f_1$  en orden descendente; de igual forma  $S_c$  y  $S_d$  son las soluciones justo anterior y posterior a  $S$  al ordenar  $F_{ind(S)}$  según los valores de  $f_2$  en orden descendente (figura 36)). En caso de que  $S$  tome valores extremos, dentro de su capa de no-dominancia, o bien para  $f_1$  o bien para  $f_2$  entonces  $cwnd\_dst(S) = \infty$ .

**Figura 36**  
**Crowding distance**



Fuente: Gómez, 2010

Con estos valores, se define un orden parcial  $\prec$ , (operador *CrowdedComparison*) de la forma siguiente. Sean dos soluciones  $S$  y  $S'$

$$S \prec S' \text{ si } [ind(S) < ind(S')] \text{ o } [(ind(S) = ind(S')) \text{ y } (cwnd\_dst(S) > cwnd\_dst(S'))].$$

Este orden parcial es el ordenamiento no dominado antes mencionado que se va a utilizar en la selección de padres y en determinar qué soluciones pasan a la siguiente generación. Con esto, se trata de favorecer, en primer lugar, la selección de soluciones menos dominadas y, en segundo lugar, soluciones más “aisladas” dentro de su capa de dominancia para tratar de rellenar esa región.

### 7.8 Adaptación a nuestro modelo

Para describir la adaptación del algoritmo NSGA-II a este problema se van describir inicialmente el procedimiento para generar soluciones iniciales aleatorias así como los operadores de cruce y mutación. Se ha de señalar lo siguiente: Como se ha comentado anteriormente, cada solución  $S$  tiene dos componentes  $ST$  conjunto de líneas y  $AL$  número de autobuses asignados a cada línea. Ahora bien con el fin de hacer una adaptación sencilla

y eficiente, estas operaciones (generación de soluciones iniciales y los operadores de cruce y mutación) de NSGA-II van a generar inicialmente nuevos vectores  $ST$ , y una vez obtenidos estos se obtienen los correspondientes componentes  $AL$ . Por tanto, con el fin de explicar más sencillamente estas operaciones identificaremos cada solución  $S$  con su componente  $ST$ .

La definición del conjunto de líneas viene definido por las estaciones que componen cada una de ellas. Recuérdese como se explicó en el capítulo anterior que, por las características del modelo, el orden de las estaciones en una línea es el lexicográfico y por tanto está determinado automáticamente por las paradas que lo componen. De la misma forma el conjunto de líneas se puede definir también por el conjunto de paradas a las que pertenece cada estación  $i$   $SL_i$ . Por ejemplo supóngase una instancia con 10 paradas y una solución  $S$  con las 2 líneas siguientes:

$$L_0: 0 - 1 - 3 - 5 - 7 - 8 - 9 \quad \text{y} \quad L_1: 0 - 2 - 4 - 5 - 6 - 8 - 9;$$

en este caso el conjunto de líneas de cada estación será  $SL_0 = \{L_0, L_1\}$  (para simplificar  $SL_0 = \{0,1\}$ ),  $SL_1 = \{0\}$ ,  $SL_2 = \{1\}$ ,  $SL_3 = \{0\}$ ,  $SL_4 = \{1\}$ ,  $SL_5 = \{0,1\}$ ,  $SL_6 = \{1\}$ ,  $SL_7 = \{0\}$ ,  $SL_8 = \{0,1\}$ ,  $SL_9 = \{0,1\}$ . Como las estaciones 0 y  $n-1$  (en este caso 9) están en todas las líneas se tiene que  $SL_0 = SL_{n-1} = \{0,1\}$ . Por tanto estos dos conjuntos se pueden omitir para definir cualquier solución. Así la solución  $S$  anterior se puede expresar como un vector de conjuntos de la siguiente forma:

$$S = (SL_1, SL_2, SL_3, \dots, SL_8) = (\{0\}, \{1\}, \{0\}, \{1\}, \{0,1\}, \{1\}, \{0\}, \{0,1\}).$$

Para generar las soluciones iniciales (es decir la componente  $ST$ ) se generan aleatoriamente los correspondientes  $SL_i$ . Sea  $Set\_of\_Lines = \{0, 1, \dots, nlin-1\}$  la generación de cada conjunto  $SL_i$  es sencilla:

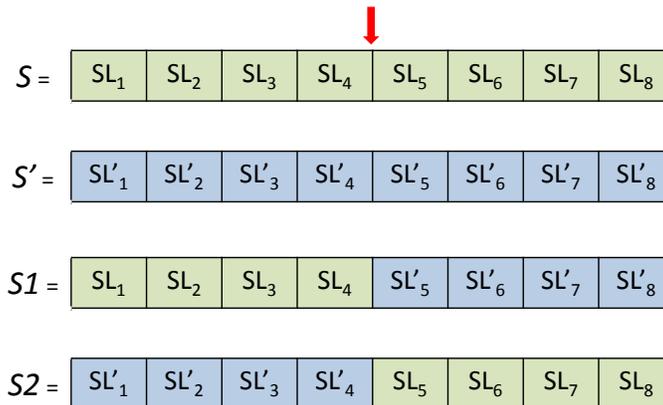
- inicialmente hacer  $SL_i = \emptyset$ ;
- $\forall j \in Set\_of\_Lines$  hacer  $SL_i = SL_i \cup \{j\}$  con una probabilidad de 0,5.

- Si  $SL_i = \emptyset$  elegir  $j \in Set\_of\_Lines$  aleatoriamente y hacer  $SL_i = \{j\}$

El operador de cruce es el clásico *one-point crossover* que actúa sobre esta representación de las soluciones en forma de vectores de conjuntos. Se muestra a continuación un ejemplo del operador de cruce para un problema con 10 paradas. Una vez seleccionas las soluciones padre  $S$  y  $S'$  se selecciona aleatoriamente un “punto de corte” y se construyen las soluciones hijas  $S1$  y  $S2$  según se ilustra en la figura 37.

**Figura 37**

**Ejemplo de operador de cruce. Una vez seleccionadas las soluciones  $S$  y  $S'$  se generan las soluciones hijas  $S1$  y  $S2$ .**



Fuente: Elaboración propia

En este mismo ejemplo supongamos que  $S$  es la solución anterior y  $S'$  la solución formada por las líneas siguientes:

$$L_0 : 0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 9 \quad \text{y} \quad L_1 : 0 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9.$$

En esta caso se puede expresar como  $S' = ( \{0\}, \{0\}, \{0\}, \{0\}, \{0,1\}, \{1\}, \{1\}, \{1\} )$ . Por tanto las soluciones hijas  $S1$  y  $S2$  son de la forma:

$$S1 = (\{0\}, \{1\}, \{0\}, \{1\}, \{0,1\}, \{1\}, \{1\}, \{1\})$$

$$S2 = (\{0\}, \{0\}, \{0\}, \{0\}, \{0,1\}, \{1\}, \{0\}, \{0,1\})$$

de esta forma las líneas para  $S1$  son:

$$L_0 : 0 - 1 - 3 - 5 - 9 \quad \text{y} \quad L_1 : 0 - 2 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9;$$

y para  $S2$  las líneas son

$$L_0 : 0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 7 - 8 - 9 \quad \text{y} \quad L_1 : 0 - 5 - 6 - 8 - 9.$$

El operador de mutación actúa sobre las representaciones vectoriales de las soluciones obtenidas tras el cruce. Concretamente cada elemento  $SL_i$  de cada solución generada  $S$  cambia (“muta”) con una pequeña probabilidad. La mutación de cada conjunto  $SL_i$  se ejecuta de la forma siguiente:

- Hacer  $SL_i = \text{Set\_of\_Lines} - SL_i$
- Si  $SL_i = \emptyset$  elegir  $j \in \text{Set\_of\_Lines}$  aleatoriamente y hacer  $SL_i = \{j\}$

Obsérvese que esta forma realizar estas operaciones (generación de soluciones iniciales, cruce y mutación) asegura que todas las estaciones estén en al menos una línea. Cuando se obtiene un nuevo conjunto de líneas, la componente  $ST$ , (ya sea por la generación inicial o tras las operaciones de cruce y mutación), la correspondiente asignación de autobuses  $AT$ , se obtiene ejecutando los procedimientos FaseC y FaseD, con  $\alpha = \beta = 1$ . Recuérdese que, si todas las estaciones pertenecen a alguna línea, el procedimiento Fase C asegura que todas las estaciones pertenezcan a alguna línea con al menos un autobús asignado y por tanto que la solución obtenida sea factible.

Además los valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  hace que estos dos procedimientos FaseC y FaseD sean determinísticos. Por tanto, en este algoritmo, todas las soluciones  $S$  vienen unívocamente determinadas por la componente  $ST$ .

Sea  $n\_pob$  ( $N$  en la descripción general de NSGA-II) el tamaño de la población inicial,  $p\_mut$ , la probabilidad de mutación o cambio de cada componente  $SL_i$  de cada solución  $S$ , la adaptación del algoritmo NSGA-II puede ser descrita de la forma siguiente:

---

**Seudocódigo 16.-** Adaptación de NSGA-II a nuestro problema

---

1. Generar la población de soluciones iniciales  $P_0$  de tamaño  $n\_pob$ .
2. Determinar  $f_1(S)$  y  $f_2(S)$  para las soluciones  $S \in P_0$ .
3. Dividir  $P_0$  en capas de no dominancia;
4. hacer  $t = 0$

**Repetir:**

5. Calcular la *crowding distance* para los elementos de  $P_t$ .
6. Generar población  $Q_t$  de soluciones hijas de tamaño  $n\_pob$  a partir de  $P_t$ .
7. Aplicar el operador mutación a los elementos de  $Q_t$ .
8. Determinar  $f_1(S)$  y  $f_2(S)$  para las soluciones  $S \in Q_t$ .
9. Hacer  $R_t = P_t \cup Q_t$  y dividir  $R_t$  en capas de no dominancia;
10. Formar  $P_{t+1}$  con los  $n\_pob$  primeros elementos de  $R_t$  según el orden parcial  $\prec$
11. Hacer  $t = t+1$ ;

**hasta** alcanzar criterio de parada;

---

La división de un determinado conjunto de soluciones ( $P_0$  en el paso 3, o  $H_t$  en el 9) se realiza mediante el procedimiento *fast-not-dominated-sort* propuesto en el propio trabajo de Deb et al. (2002). El proceso de *renovación* (paso 10), es decir, determinar los elementos de  $R_t$  que pasan a la siguiente generación (“sobreviven”) se realiza de la forma siguiente:

---

**Seudocódigo 17.-** Renovación o selección de los elementos que sobreviven

---

1. Denótese por  $F_1, F_2, F_3, \dots$  las capas de no-dominancia en que se divide  $R_t$ .
  2. Hacer  $i = 1$  y  $P_{t+1} = \emptyset$ .
  3. Mientras  $|P_{t+1}| + |F_i| \leq n\_pob$  hacer  $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$   $i=i+1$ .
  4. Calcular la *crowding distance* para los elementos de  $F_i$ .
  5. Incluir en  $P_{t+1}$  los  $n\_pob - |P_{t+1}|$  elementos de  $F_i$  con mayor *crowdingdistance*
-

Finalmente, como criterio de parada de NSGA II se puede usar un máximo número de iteraciones total o un número de iteraciones sin cambios en  $P_t$ , un tiempo máximo de computación, etc.

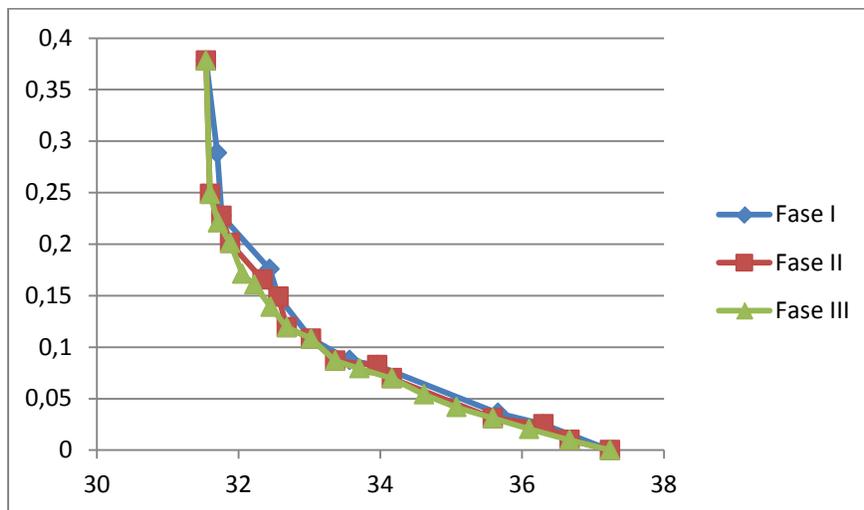
### 7.9 Pruebas computacionales: Resultados de las tres fases de MOAMP

Se han realizado una serie de pruebas computacionales para comprobar el funcionamiento del método MOAMP propuesto. Todas las pruebas se han realizado con las 40 instancias pseudoreales así como la instancia real definidas en el capítulo anterior. En todos los casos MOAMP ha utilizado el valor del parámetro  $max\_iter\_faseii = 10$ . En cada caso tras la ejecución de MOAMP se obtiene un conjunto de soluciones no dominadas.

A continuación se muestra la representación gráfica de este conjunto de soluciones para la primera instancia de cada tipo, así como para la instancia real. En las gráficas se representan mediante distintos colores las tres fases del algoritmo MOAMP: fase 1(verde), fase 2 (azul) y fase 3 (granate).

**Figura 38**

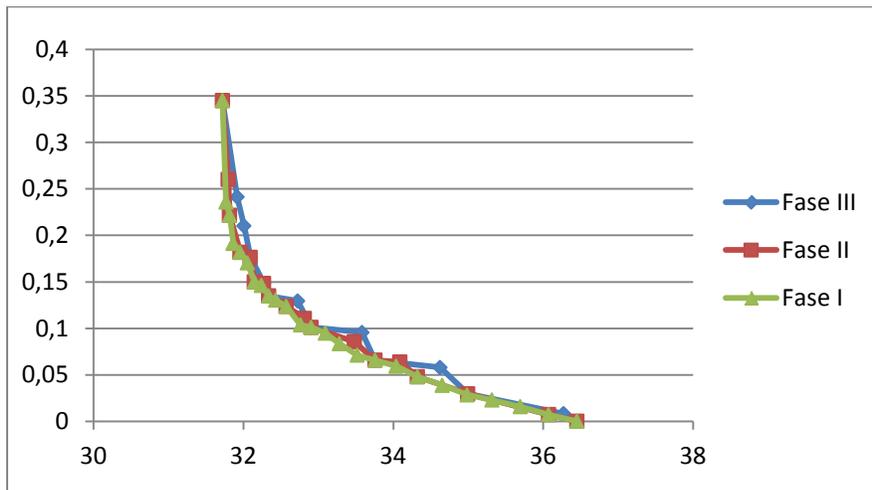
**Resultados de MOAMP en la instancia 1**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 39**

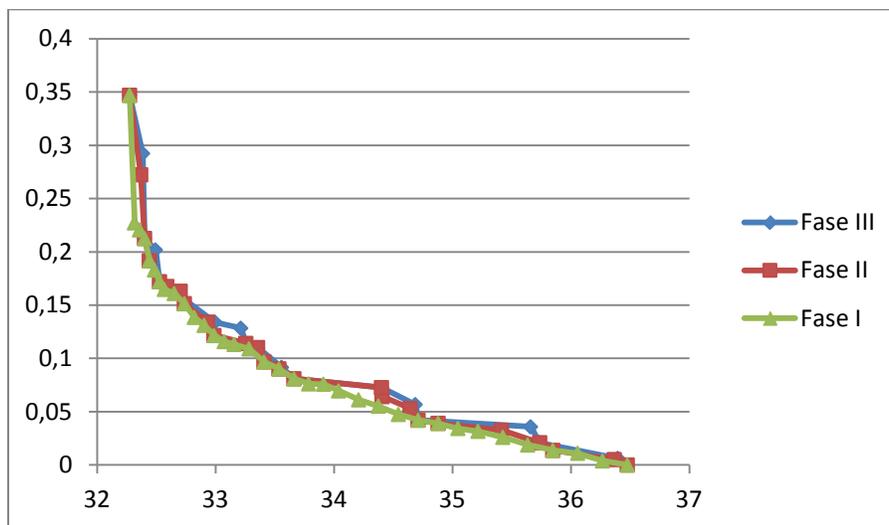
**Resultados de MOAMP en la instancia 11**



Fuente: Elaboración propia

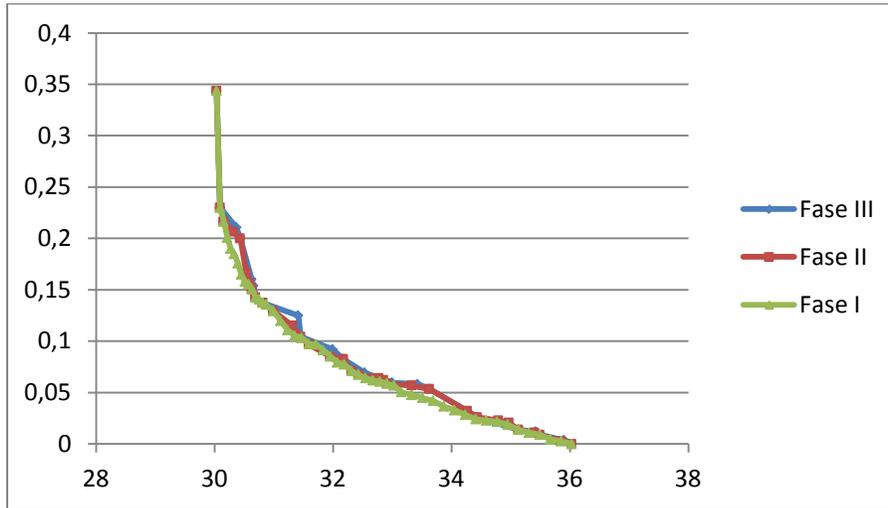
**Figura 40**

**Resultados de MOAMP en la instancia 21**



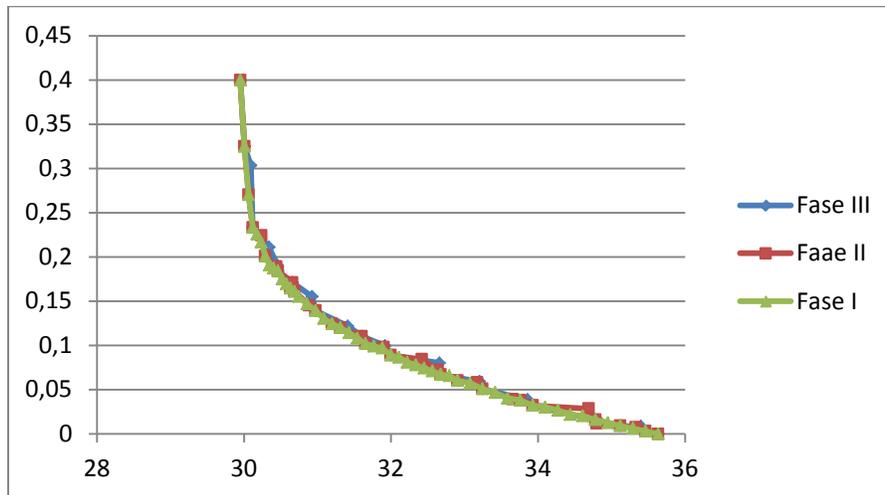
Fuente: Elaboración propia

**Figura 41**  
**Resultados de MOAMP en la instancia 31**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 42**  
**Resultados de MOAMP en la instancia real**



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 26 se muestra el número medio de soluciones por cada tipo de instancia en cada fase y el número obtenido en la instancia real:

**Tabla 26****Número de soluciones en cada fase**

<b>Instancias</b>	Fase I	Fase II	Fase III
<b>Tipo 1</b>	11	15	18
<b>Tipo 2</b>	14	18	25
<b>Tipo 3</b>	19	25	35
<b>Tipo 4</b>	24	32	50
<b>Real</b>	25	35	50

Fuente: Elaboración propia.

**7.10 Movimientos por índices. Efecto en el tiempo de computación**

Finalmente, para contrastar el efecto del uso de la gestión de índices se realizan una serie de pruebas. En concreto, se ejecutan dichos procedimientos considerando ambas variantes, sin gestión de índices y con gestión de índices en las instancias generadas anteriormente. En este caso, sólo se consideran las instancias pseudoreales. En la tabla 27 se muestran los tiempos de computación empleados y la reducción obtenida:

**Tabla 27****Resultados de los tiempos de computación**

<b>Tipo</b>	<b>Inst.</b>	<b>Sin Gestión de índices</b>	<b>Con Gestión de índices</b>	<b>Ratio de Reducción</b>	<b>Ratio medio</b>
1	1	305	204	0,3311	0,3809
	2	299	198	0,3378	
	3	350	193	0,4486	
	4	299	176	0,4114	
	5	410	246	0,4000	
	6	180	97	0,4611	
	7	315	196	0,3778	
	8	311	200	0,3569	
	9	199	129	0,3518	
	10	340	227	0,3324	
2	11	750	336	0,5520	0,54787556
	12	725	291	0,5986	
	13	800	310	0,6125	
	14	952	459	0,5179	

Tipo	Inst.	Sin Gestión de índices	Con Gestión de índices	Ratio de Reducción	Ratio medio
	15	689	340	0,5065	
	16	660	275	0,5833	
	17	836	417	0,5012	
	18	912	376	0,5877	
	19	599	307	0,4875	
	20	698	327	0,5315	
3	21	2259	868	0,6158	0,59876771
	22	2345	1133	0,5168	
	23	4025	1439	0,6425	
	24	1985	616	0,6897	
	25	2950	1141	0,6132	
	26	1985	638	0,6786	
	27	1990	990	0,5025	
	28	2358	748	0,6828	
	29	3580	1674	0,5324	
	30	2610	1270	0,5134	
4	31	10750	2287	0,7873	0,68355762
	32	11235	4200	0,6262	
	33	9856	2463	0,7501	
	34	12598	5127	0,5930	
	35	6982	1907	0,7269	
	36	7985	3198	0,5995	
	37	11009	3362	0,6946	
	38	12125	4036	0,6671	
	39	9852	2535	0,7427	
	40	10350	3641	0,6482	

Fuente: Elaboración propia.

Observando estos resultados de la tabla, se comprueba que con la gestión de índices se obtienen reducciones importantes en los tiempos de computación y además estas reducciones son mayores a medida que aumenta el tamaño del problema y por tanto el número de soluciones no dominadas que se actualizan.

### 7.11 Comparación de MOAMP con NSGA II

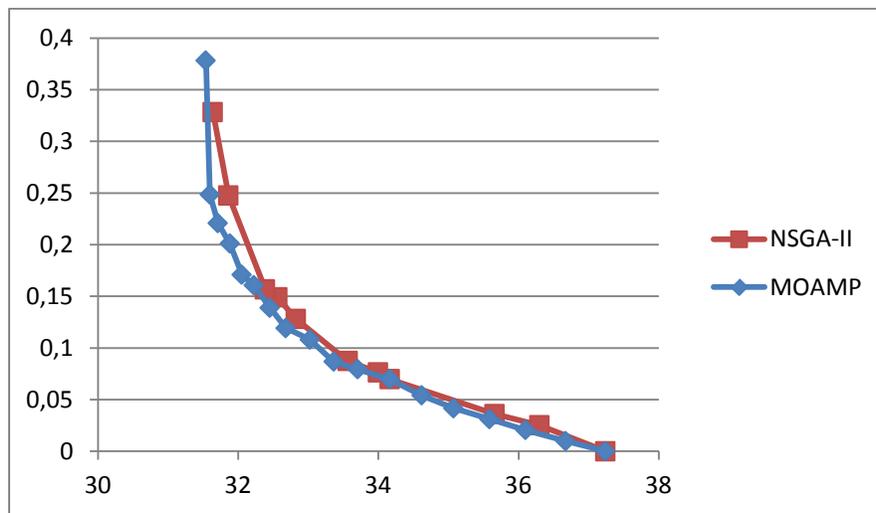
A continuación se muestra una serie de gráficas en el que se compara el conjunto de puntos

no dominado obtenidos por MOAMP con el conjunto de puntos no dominados obtenidos con NSGA II para cada instancia (tanto las instancias pseudoreales como la instancia real).

Inicialmente se ejecuta el procedimiento MOAMP y se registra el número de soluciones no dominadas ( $|Set_{ND}|$ ) y el tiempo de computación empleado (en segundos). Entonces se ejecuta NSGA- II tomando  $n_{pob} = 2 \cdot |Set_{ND}|$  y  $p_{mut} = 0.02$ . Con el objeto de ilustrar se toma una instancia de cada tipo:

**Figura 43**

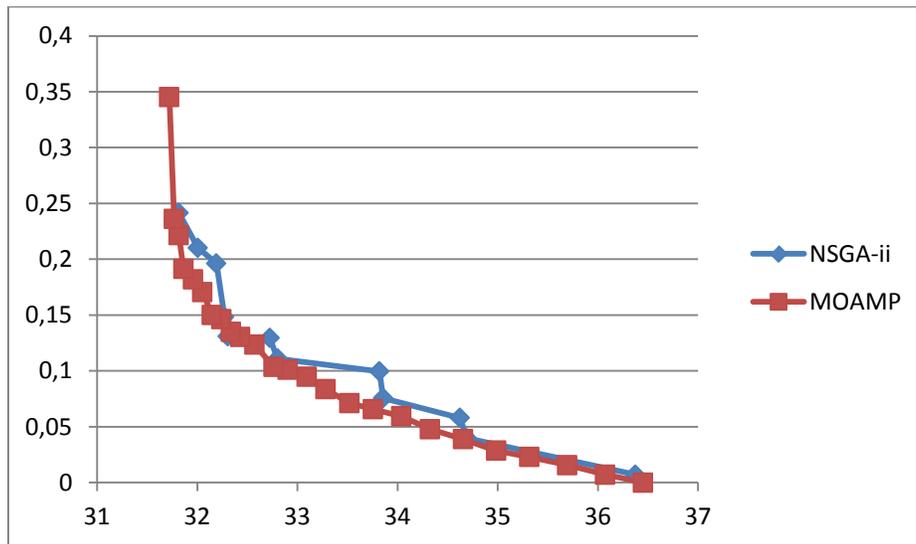
**Conjuntos de soluciones no dominadas para la instancia 1**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 44**

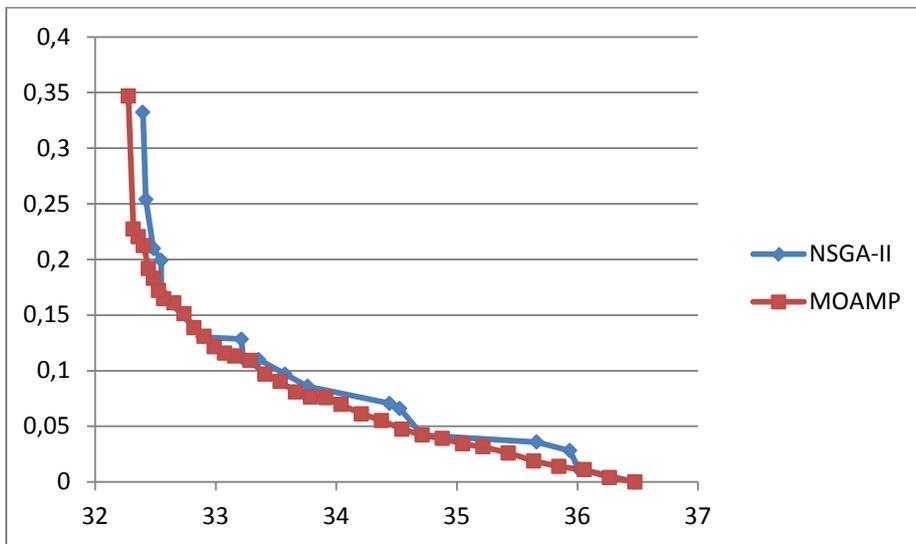
**Conjuntos de soluciones no dominadas para la instancia 11**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 45**

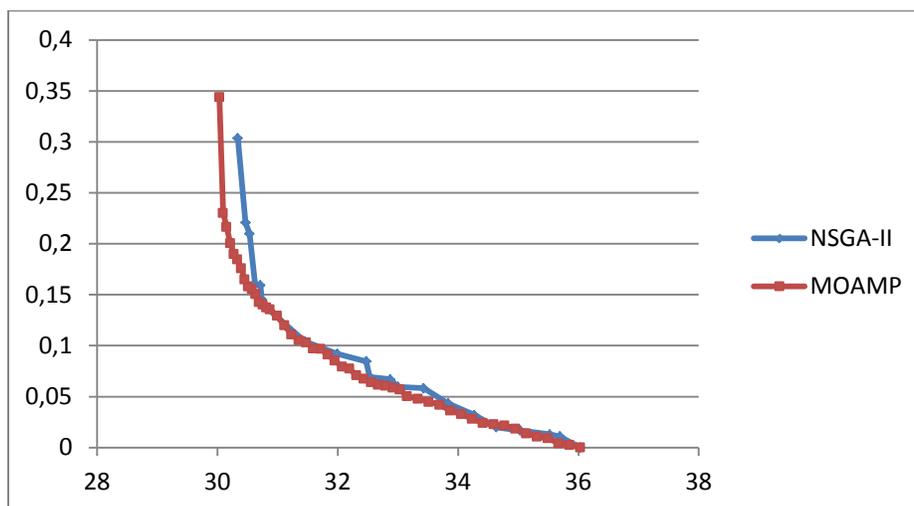
**Conjuntos de soluciones no dominadas para la instancia 21**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 46**

**Conjuntos de soluciones no dominadas para la instancia 31**



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las figuras anteriores nuestra estrategia MOAMP produce conjuntos de soluciones más densos y numerosos, y con mejor comportamiento en los extremos. Además ninguna solución de las soluciones obtenidas por MOAMP está dominada por solución es de NSGA-II. En el lado contrario, casi todas las soluciones obtenidas por NSGAII están dominadas por soluciones MOAMP. Sólo hay un número pequeño de ellas que coinciden con soluciones MAOMP y por tanto no son dominadas. En la tabla 28 se resumen el número medio redondeado, por tipo de instancia, de soluciones encontradas por cada método y cuántas de ellas están no dominadas por el otro método:

**Tabla 28**

**Soluciones obtenidas por cada estrategia**

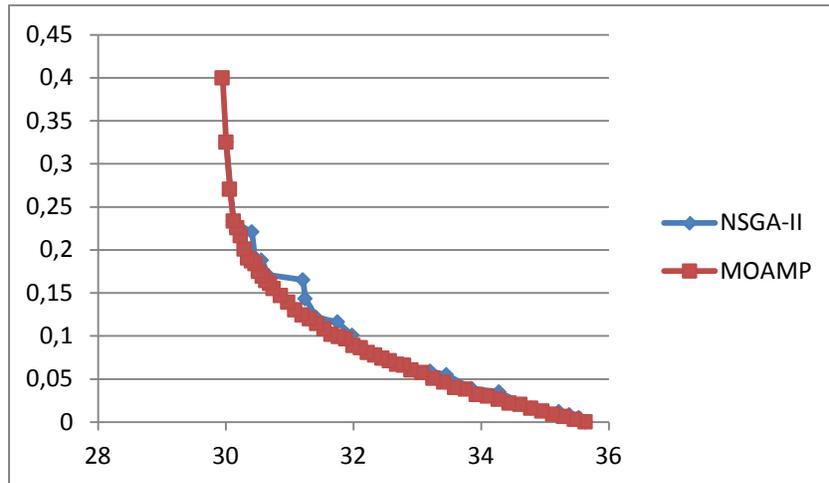
Instancias	MOAMP		NSGA-II	
	Número de soluciones	No dominadas por NSGA-II	Número de soluciones	No dominadas por MOAMP
Tipo 1	18	18	11	2
Tipo 2	25	25	14	2
Tipo 3	35	35	18	2
Tipo 4	50	50	21	2

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se muestra la figura 47 con los conjuntos de soluciones obtenidos por cada método en la instancia real:

**Figura 47**

**Conjuntos de soluciones obtenidas en la instancia real**



Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en las instancias pseudoreales, en la instancia real el método MOAMP consigue un mayor número de soluciones, con mejor comportamiento en los extremos y que en ningún caso son dominadas por soluciones obtenidas por NSGA-II. En el caso de NSGA-II todas sus soluciones son dominadas por MOAMP excepto un número pequeño de ellas que coinciden con alguna obtenida por MOAMP.

Finalmente el análisis de la curva de eficiencia puede dar mucha información al decisor. Si se observa el “extremo izquierdo” representa la solución “óptima” con respecto al tiempo total de viaje, con  $f_1 = 29,94$  y  $f_2 = 0,3996$ . Ahora bien, la cuarta solución empezando por ese extremo izquierdo tiene unos valores muy parecidos en cuanto al tiempo de viaje y sin embargo ha reducido considerablemente el número de trasbordos, concretamente  $f_1 = 30,11$  y  $f_2 = 0,2333$ . Luego incluso, usuarios que estén interesados más en la rapidez que en la comodidad podrían ver razonable esta alternativa en periodos lectivos o no vacacionales.

En definitiva este tipo de análisis y reflexiones se puede hacer gracias al enfoque biobjetivo

y al uso de un método que nos proporcione un conjunto denso, de soluciones no dominadas de calidad y con buen comportamiento en los extremos.

### **7.12 Conclusiones del método**

Se ha desarrollado un método para resolver el problema biobjetivo de transporte urbano planteado. El objetivo del problema es doble: la reducción del tiempo total de viaje y la reducción del número de trasbordos (en ambos casos valores medios por pasajero). Obviamente, estos dos objetivos, no son comparables y además suelen entrar en conflicto. El método desarrollado aporta un conjunto denso de soluciones no dominadas con las que se puede encontrar un equilibrio adecuado entre ambos objetivos. Desde este punto de vista biobjetivo el problema es nuevo y no existen referencias anteriores donde se aborde desde esta perspectiva.

Asimismo, se ha creado un método ad hoc para este problema que sigue las ideas de la estrategia MOAMP, diseñada para problemas multiobjetivo. La estrategia MOAMP se desarrolla en 3 fases: La primera fase trata de obtener buenas soluciones del problema teniendo en cuenta las distintas funciones objetivo del mismo. En la segunda fase, también se obtienen buenas soluciones, pero en este caso, se consideran funciones objetivo mixtas. Por último, en la tercera fase se exploran las soluciones vecinas de las soluciones no-dominadas. En la tercera fase del proceso se utilizan distintos metaheurísticos como búsqueda tabú y búsqueda por entornos variables.

En nuestro caso el “motor” del método MOAMP ha sido el procedimiento de búsqueda tabú desarrollado en el capítulo anterior adaptado a diferentes funciones objetivos (las funciones objetivos originales y funciones objetivos mixtas). Por tanto la implementación en este caso ha resultado relativamente sencilla, una vez que se habían implementado los procedimientos del capítulo anterior.

En relación a la comparación con otros métodos, se muestra en este capítulo una comparativa del método diseñado, basado en la estrategia MOAMP, con NSGA II.

Consiguiéndose con MOAMP curvas de eficiencia con un mayor número de soluciones que además dominan a las soluciones obtenidas con NSGA II salvo alguna excepción. La comparación de ambas estrategias se realiza tanto para las instancias pseudoreales creadas como para la instancia real.

Para finalizar, se puede concluir que el diseño de estrategias basadas en MOAMP adaptadas a las características de un problema en concreto produce resultados considerablemente mejores que la utilización de estrategias más generales, en este caso NSGA II. También debemos tener en cuenta que esto supone un trabajo adicional de diseño e implementación aunque creemos que al final resulta beneficioso.

### **7.13 Recomendaciones para mejorar los servicios del transporte urbano del Metrobús**

A diez años del comienzo de operaciones de la Línea 1 del Metrobús, ésta se encuentra saturada. Ejemplos de ello es el tiempo de espera de un pasajero en abordar un autobús. Que, en el caso de la terminal de Indios Verdes, ronda en los veinte minutos y en la estación de Tepalcates, por las mañanas, (entre las 7:00 y 9:00 horas) se forman largas filas para ingresar al área exclusiva de mujeres. La afluencia de pasajeros no logra disminuir, a lo largo de las primeras catorce estaciones, y la unidad se desahoga hasta la estación de Insurgentes; enfrentamientos entre los pasajeros, que esperan en los andenes; e incomodidad durante el trayecto, debido a que las unidades van a su máxima capacidad, y la mayoría de la gente viaja de pie (49 personas sentadas y más de 200 paradas).

Ante la problemática presentada y habiendo planteado el diseño de varias líneas y la asignación de los vehículos disponibles a cada una de ellas con el fin de mejorar los tiempos totales de viaje, es conveniente sugerir otras formas de medición y análisis. Entre ellas están la aplicación de encuestas a los usuarios para llevar a cabo futuras estimaciones de demanda, con el fin de conocer las necesidades de los clientes y así, poder corregir las áreas de oportunidad existentes.

Pese a que las nuevas soluciones (donde hay varias líneas que no necesariamente paran en todas las estaciones) mejoran de forma relevante y significativa los tiempos totales de viaje por pasajero al compararlas con la solución actual (una línea con todas las estaciones), se recomienda que en estudios futuros se tome en cuenta el grado de satisfacción de los usuarios, conformado por el valor percibido (valor obtenido a través del desempeño del servicio) y las expectativas al utilizar el Metrobús.

Otras alternativas para mejorar el funcionamiento actual, además de las que se derivan del análisis del modelo planteado en este trabajo se citan a continuación. Se han puesto en marcha paliativos para combatir el crecimiento desmedido en el uso de dicho medio de transporte, como la incorporación de un mayor número de autobuses biarticulados, lo cual no ha sido suficiente ante el incremento de la demanda, a la poca superficie de rodamiento suficiente y el coste de operación del vehículo es mayor al de un articulado. Así mismo, se han propuesto diversas soluciones, entre ellas el control del corredor, por un mando central, que programe mejor los viajes que se realizan; la construcción de ejes paralelos, funcionando con velocidades y características similares al Metrobús, para no cargar todo sobre la Avenida de los Insurgentes; y la construcción de diversas alternativas de transporte, que se mencionarán a continuación. Sin embargo, las restricciones urbanísticas, para aumentar la capacidad del servicio, representa inversiones de millones de dólares por kilómetro.

Entre otras alternativas de transporte propuestas se encuentran la construcción de un tranvía, con un coste aproximado de cuarenta millones de dólares por kilómetro; realizar obras nocturnas; cobrar una tarifa superior; y/o utilizar vehículos de tres metros de ancho y cuarenta metros de largo. En términos de capacidad, se hablaría de 300 a 400 pasajeros. Uno de los principales problemas de la Avenida de los Insurgentes está en la semaforización. Los tranvías no resolverían este problema, por lo que se tendría un tranvía por minuto con 400 pasajeros. Esto da 24,000 pasajeros por dirección, en hora de máxima demanda; lo cual es mayor a los que atiende el Metrobús. Sin embargo, no incrementaría la capacidad en la misma proporción, porque se trata de la capacidad, en hora de máxima demanda y bajo supuestos de operación difíciles de alcanzar (un tranvía por minuto). Esto

se llevaría al cabo de algunos años, cuando la oferta del tranvía también quedara rebasada y se mantuvieran tiempos de traslado muy similares a los actuales.

Otra alternativa es la construcción de un tren expreso, manteniendo el servicio del Metrobús en Insurgentes. Un tren de “El Caminero” a “Indios Verdes”, con paradas cada tres kilómetros, podría complementar el servicio del Metrobús. Esto podría generar, en una primera etapa, no menos de 200,000 viajes adicionales, sin alterar la capacidad del Metrobús. Operaría con menor cantidad de trenes, por la velocidad del servicio, y menor cantidad de estaciones, en una obra completamente subterránea, conectada a edificios y a centros comerciales existentes. El problema de esta alternativa es el coste, entre setenta cien millones de dólares por kilómetro; además de que operaría con una tarifa elevada, sujeta a la distancia.

Una de las propuestas, para solucionar el problema de saturación, se encuentra en instalar un servicio de rebases en el Metrobús, a través de líneas en las que se puede dividir la línea 1, en las cuales habría reacomodo de las estaciones y de los autobuses. Es decir, la eliminación de las estaciones poco concurridas, reubicación de estaciones en las diferentes líneas en las que se puede dividir la línea 1 (planteadas en el capítulo 6), que los vehículos no hagan parada en todas las estaciones y eficientar la frecuencia de paso de los autobuses, en las diferentes estaciones, y el tiempo de permanencia en las mismas; lo que agilizaría el servicio del Metrobús. Esto implicaría reducir al mínimo la circulación de los automóviles en el corredor Insurgentes, o al menos en los tramos centrales, de las estaciones “Dr. Gálvez” a “Indios Verdes”. Un sistema de rebases, daría lugar a servicios directos, regulares y con pocas paradas, podría ser aplicable a otras líneas y permitir la alimentación en forma de “espina de pez”. Algunas estaciones crecerían de tamaño, se tendría la necesidad de colocar concreto en todo el ancho de la avenida y corregir la señalización.

Derivado de lo anterior, se propone que en las líneas en las que puede ser dividida la línea 1, los vehículos no comenzaran a operar desde las terminales (“Indios Verdes” o “El Caminero”), sino desde alguna de las estaciones ubicadas a la mitad del corredor, en

especial en las horas de mayor demanda. Esto ayudaría a que los autobuses operaran prácticamente en la mayoría de las estaciones, desahogando los tiempos de espera y de trayecto, maximizando el servicio ofrecido y evitando la migración de los usuarios a otros servicios alternativos de transporte.

Otra propuesta es el aumento del ancho de vía, a lo largo de las estaciones del corredor, especialmente en las que se encuentran en la zona central. Esto con el fin de habilitar un carril adicional, para permitir los rebases y el reacomodo de los autobuses, para minimizar el tiempo de espera y de trayecto, sobre todo en el punto más angosto de la línea. Dicho punto es también el de mayor saturación y se encuentra en la zona de Insurgentes, particularmente entre las estaciones “Durango” y “Metro Insurgentes”.

#### **7.14. Apéndice. Aspectos técnicos sobre programación y tiempos de computación**

Los diferentes algoritmos descritos en este trabajo se han implementado en lenguaje Object Pascal usando el compilador Delphi 5.0 y el compilador Delphi XE 2.0 con el entorno de desarrollo RadStudio XE 2.0.

El equipo informático en el que se han ejecutado estos algoritmos en las diferentes pruebas computacionales ha sido un ordenador personal con procesador Intel Core i7-4790 a 3.6 GHz y 16 GB de memoria RAM.

Los tiempos de computación (en segundos) de los principales algoritmos se muestran en la tabla 29. Se muestran los tiempos de cálculo usados por el algoritmo de Búsqueda Local, Búsqueda Tabú, *MultiStarTabu* y MOAMP tanto en las instancias seudoreales como en la instancia real. Hay que indicar que no se muestra los tiempos de cálculo empleados por nuestra adaptación de NSGA-II ya que como se ha explicado en este capítulo, para cada instancia este algoritmo finaliza su ejecución cuando alcanza el tiempo de cálculo usado por MOAMP.

**Tabla 29****Tiempos de computación de las diferentes estrategias**

Instancia #	BLocal	BTabu	<i>MultiStarTabu</i>	MOAMP
1	0,016	0,059	0,233	0,511
2	0,011	0,033	0,163	0,399
3	0,008	0,034	0,163	0,385
4	0,008	0,034	0,166	0,399
5	0,005	0,033	0,156	0,370
6	0,010	0,038	0,180	0,380
7	0,008	0,034	0,171	0,381
8	0,007	0,034	0,168	0,416
9	0,005	0,032	0,163	0,379
10	0,010	0,036	0,165	0,397
11	0,790	3,515	16,228	34,141
12	0,583	4,616	18,218	41,574
13	0,446	3,449	15,086	36,182
14	0,892	3,017	12,446	30,745
15	1,000	3,994	15,115	31,875
16	0,720	3,459	14,973	33,146
17	0,418	3,611	18,308	38,746
18	0,429	3,313	13,202	31,828
19	0,465	4,191	13,631	30,734
20	0,651	3,756	13,131	32,489
21	11,031	47,452	232,899	572,858
22	14,343	49,581	189,688	452,541
23	12,809	46,750	182,421	439,431
24	10,915	46,386	194,727	468,794
25	14,410	50,206	188,718	397,141
26	11,606	55,106	304,293	711,122
27	10,826	48,871	191,027	426,621
28	11,763	46,508	190,073	420,592
29	11,068	46,692	233,509	552,876
30	8,923	44,151	196,960	473,105
31	80,608	306,251	1871,242	4121,927
32	83,712	292,768	1480,735	3239,433
33	83,842	291,754	1483,109	3478,919
34	106,345	313,439	1606,497	3939,938
35	95,390	305,604	1211,154	2766,216
36	90,891	304,618	1529,151	3292,823
37	81,168	324,347	1244,195	2999,865
38	80,863	324,388	1244,217	2910,042
39	79,799	291,376	1518,349	3372,458

Instancia #	BLocal	BTabu	<i>MultiStarTabu</i>	MOAMP
40	84,124	322,759	1766,854	3817,591
Real	86,126	321,005	1329,115	3168,223

Los tiempos de computación de la Búsqueda Local se corresponden con las pruebas descritas en la sección 6.12, y concretamente con los resultados de la última columna de la tabla 17, es decir cuando la solución inicial se obtiene con el método TodasFases con los valores de los parámetros  $\alpha_1 = 1$ ,  $\beta_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = 1$ ,  $\beta_2 = 1$ ,  $\alpha_3 = 1$ ,  $\beta_3 = 0.5$  y  $niter = 100$ .

Los tiempos de computación de la Búsqueda Tabú se corresponden con las pruebas descritas en la sección 6.13 y concretamente con los resultados de la segunda columna de la tabla 19, es decir usando la combinación 1 de parámetros de este procedimiento y como solución inicial obtenida con el método TodasFases con los valores de los parámetros antes indicados.

Los tiempos de computación del método *MultiStarTabu* se corresponden con las pruebas descritas en la sección 6.14, cuyos resultados se muestran en tabla 20. Los tiempos de computación usado por restas 3 estrategias en la instancia real se corresponden con las pruebas descrita en la sección 15 cuyos resultados se muestran en las tablas 21 y 22.

Los tiempos de computación del método MOAMP se corresponden con las pruebas realizadas y descritas en el capítulo 7. En el capítulo siguiente, concretamente en la sección 8.1 Extensiones y limitaciones se reflexionará sobre estos tiempos de computación.

**CAPITULO 8:**  
**COMENTARIOS FINALES**



## 8.1 Extensiones y limitaciones

En este trabajo se ha analizado un modelo para la optimización o al menos la racionalización de los sistemas de BRT que se ha inspirado en la problemática de la red de Metrobús en la Ciudad de México, y más concretamente en la línea 1 correspondiente a la Avenida de los Insurgentes. Concretamente se ha considerado inicialmente un modelo con un objetivo (minimizar el tiempo total de viaje), y posteriormente se ha añadido un segundo objetivo (reducir el número de trasbordos). Ambos objetivos son medidas del nivel de servicio.

El modelo consiste en diseñar las líneas correspondientes a ese corredor y asignar los autobuses disponibles a cada línea de forma que se optimicen los dos objetivos considerados. El diseño de líneas implica determinar que estaciones componen cada una de estas líneas, de forma que no necesariamente todas las estaciones estén en una sola línea. Deben existir no obstante, algunas estaciones en común, entre las diferentes líneas de forma que se asegure, por medio de los correspondientes trasbordos si fuera necesario, el traslado entre los diferentes pares de estaciones.

Uno de los aspectos, entendemos, más ambiciosos de este planteamiento es considerar que, una vez establecido y desarrollada una determinada solución y tras un tiempo de adaptación y aprendizaje, los pasajeros o usuarios conocerán perfectamente que recorrido es el más conveniente (es decir que líneas se usan y que trasbordos se realizan) para cada uno de ellos, es decir, que recorrido es el que lleva menos tiempo (o menos trasbordos). Esto entendemos que es un planteamiento realista, y que se corresponde con el comportamiento de los usuarios habituales de los diferentes medios de transporte: la experiencia hace que estos usuarios conozcan cual son los recorridos más rápidos o más cómodos. Por tanto, el recorrido que realiza cada persona es la solución a “su problema del camino mínimo particular”. Por esa razón hemos considerado que la forma de calcular las diferentes funciones objetivos que se consideran es precisamente por la resolución del problema del camino más corto (más rápido) entre todos los pares de estaciones del modelo. Por tanto,

entendemos que, esta forma de calcular los diferentes objetivos es más ajustada y realista que otras que se consideran en trabajos similares.

Este planteamiento además permite ser extendido y aplicado a otros modelos. Una primera extensión sería considerar el diseño de las líneas de todos los corredores de la red, con la correspondiente asignación de autobuses, y no sólo los de un corredor. En este caso se tomaría como datos de entrada las demandas de pasajeros entre todos los pares de estaciones de toda la red, no sólo entre estaciones del mismo corredor. Por otra parte en el modelo inicial para que una solución sea factible tiene que cumplir la condición de que cada estación pertenezca al menos a una línea con algún autobús asignado. En este modelo extendido, además de eso, se debe cumplir que los corredores tengan algunas estaciones en común que asegure la conectividad entre todas las estaciones de la red. Esto, por ejemplo, sí que ocurre en la red de Ciudad de México, como se puede ver en el capítulo 5.

Otra extensión del presente modelo sería el diseño de redes de transporte de autobuses urbanos donde no necesariamente las líneas se corresponden con corredores o avenidas prefijadas. Al igual que en el caso anterior se parte del conocimiento de las demandas de pasajeros entre todos los pares de estaciones. En estos casos el espacio de posibles soluciones es de mayor dimensión, ya que hay más “grados de libertad” para el diseño de las líneas. Normalmente se consideran dos tipos de líneas: a) las compuestas por dos semi-líneas donde la estación final de una semi-línea es la estación inicial de la otra semi-línea, y b) las líneas “circulares” donde el origen y final coinciden. Así el primer tipo de líneas es de la forma:

$$O - x - y - \dots - z - F - a - b - \dots - c - O$$

donde O, y F representan las estaciones origen y final de las dos semi-líneas;  $O - x - y - \dots - z - F$  representa a la primera semi-línea y  $F - a - b - \dots - c - O$  a la segunda. Las estaciones de ambas semi-líneas no tienen porqué coincidir (aunque sea en sentido inverso).

Además esta coincidencia no siempre es posible debido a las direcciones prohibidas o sentidos únicos de muchas calles. Por otra parte las líneas circulares son de la forma:

$$O - x - y - \dots - z - O$$

donde O, es la estación origen y final. En algunas ciudades se exige a los pasajeros que bajen cuando llegan a la estación O, y en otras no.

Al margen de estas dos tipos de líneas no suele haber más restricciones o condiciones en el diseño de las mismas. Como en los modelos anteriores el grafo correspondiente a cada solución debe conectar a todos los pares de estaciones en ambos sentidos (al menos los que tienen demanda estrictamente positiva). Además, cada estación debe estar incluida en al menos una línea con algún autobús asignado.

Finalmente una tercera extensión posible serían modelos de transporte urbano intermodal. En este caso se contempla el diseño de líneas de autobuses y la asignación de autobuses a líneas con el fin de optimizar los objetivos considerados en los modelos anteriores. Sin embargo en estos modelos intermodales se tiene en cuenta la infraestructura de otros servicios de transporte público existentes como tranvías, trenes de cercanías o metro, con sus líneas, vehículos y frecuencias ya establecidos. La idea es diseñar las líneas de autobuses urbanos y la asignación de vehículos a líneas de forma que los tiempos totales de recorrido (y/o los trasbordos realizados) en todo el sistema de transporte urbano sea lo mínimo posible. En este caso se deben conocer como datos de entradas las estimaciones de las demandas entre todas las estaciones de todos los servicios existentes (autobuses, tranvías, trenes de cercanías, metro). Así mismo el grafo asociado a cada solución tendrá una parte fija (los arcos asociados a los otros servicios con sus costes correspondientes) y una parte variable (correspondientes a las líneas que estamos diseñando).

En este sentido también se pueden considerar modelos donde hay una parte fija (algunas líneas que no se desea cambiar por alguna razón) y parte variable. La solución sólo se

refiere a la parte variable, pero en el diseño del grafo asociado y por tanto en el cálculo de la función objetivo, se incluyen los arcos correspondientes a las líneas fijas.

El modelo considerado en este trabajo, así como estas posibles extensiones, tiene, no obstante dos importantes limitaciones. Una se refiere a la estimación de las demandas entre los diferentes pares de estaciones. En nuestro caso se ha hecho, como se ha explicado, un trabajo de campo, que ha sido complementado con la colaboración de los conductores, y de varios de los clientes que accedieron a responder cuáles eran sus estaciones orígenes y destinos. Teniendo en cuenta las respuestas y ponderando en los usuarios totales de las diferentes paradas se ha podido hacer una estimación de las demandas en los diferentes días, y a partir de allí una estimación media. Aunque el trabajo de campo ha sido grande, no obstante ha sido metodológicamente sencillo. Ahora bien, esto no es posible en todas las ocasiones, sobre todo cuando la dimensión del problema es mayor y no se cuenta con los medios adecuados y la colaboración de los empleados. No obstante, con las tarjetas monedero, es posible que esta información (los destinos inicial y final de cada usuario) se pueda registrar de alguna manera para hacer las estimaciones pertinentes.

La segunda limitación tiene relación con los tiempos de computación total de los métodos empleados. En la instancia real considerada el número de paradas era moderado y el tiempo de computación máximo (el empleado por *MultiStartTabu*) en el modelo mono-objetivo ya se acercaba a los 1400 segundos aproximadamente y en el modelo biobjetivo se acercaban a los 3,200 segundos (más de 50 minutos). Obviamente este tipo de aplicaciones y modelos de diseño de redes de transporte público no requieren soluciones on-line un tiempo de computación pequeño. Las autoridades o empresas responsables de este diseño pueden perfectamente, así lo creemos, esperar horas o incluso unos pocos días a la finalización de la ejecución de los algoritmos propuestos, siempre que la solución o soluciones obtenidas permitan una mejora significativa en los objetivos analizados.

El problema y las dudas que se nos plantean es ¿Cuál es el tamaño o la dimensión máximo de los problemas que se podrían resolver con este enfoque? La red de BRT de Ciudad de México, Metrobús, cuenta con cerca de 200 estaciones sólo en esta red. La ciudad de

Burgos, una ciudad mediana en España, tiene más de 360 paradas de autobuses. ¿En cuánto tiempo podría obtenerse una solución en estos casos? No es difícil buscar, por otra parte, ejemplos de ciudades con mayor número de estaciones o paradas. Este excesivo tiempo de computación se debe, como hemos comentado, principalmente al tiempo empleado a la resolución del SPP en el grafo asociado a cada solución para calcular los objetivos de cada solución analizada.

Sin embargo esta limitación también estimula nuevas líneas de investigación en torno a las formas de intentar mejorar estos tiempos de computación:

- Analizar con más profundidad los métodos para resolver el SPP entre todos los pares de puntos de un grafo de este tipo
- Explorar un número de soluciones vecinas más limitado, intentando analizar que partes de cada vecindario son más atractivas o prometedoras. En este sentido también se puede analizar, cuando se ejecuta un movimiento concreto, que otros movimientos quedan afectados y cuáles no para evitar evaluarlos en iteraciones posteriores.
- Buscar algún método (por ejemplo elaborar algún tipo de función subrogada) que permite una estimación rápida de los valores de la función objetivo sin tener que resolver el SPP.
- En definitiva, el presente trabajo presenta, a nuestro entender un modelo audaz a la vez que realista que sugiere nuevas e interesantes líneas de trabajo tanto en sus posibles extensiones como en las formas de resolver sus limitaciones.

## **8.2 Conclusiones**

En el entorno socioeconómico actual es necesaria la optimización de los servicios públicos, en especial los referentes al transporte. Los tomadores de decisiones, encargados de la

planificación y del diseño de este tipo de servicios, han llevado a cabo diversas soluciones para corregir los problemas existentes. Sin embargo, al menos hasta ahora, no llegan a alcanzar el nivel al que se puede llegar, con las herramientas descritas en la presente investigación.

El proceso de toma de decisiones, enfocado a la mejora del servicio ofrecido en los sistemas de transporte BRT, como el que aquí se propone, posee un enfoque multiobjetivo que facilita un análisis claro del papel y del valor de cada elemento y del grado de flexibilidad que se puede dar a cada objetivo/función. Este tipo de problemas, como el que aquí se trata, presenta una elevada complejidad, derivada del número de objetivos que se abordan (tiempo de viaje, tiempos de espera y número de tránsitos, entre otros). Dichos objetivos, están generalmente en conflicto, derivado del elevado número de poblaciones a visitar y de una serie de restricciones a cumplir, como la capacidad de los vehículos y de la frecuencia de paso por las distintas estaciones, entre otros.

En este trabajo se estudió un problema de reestructuración operativa en la Línea 1 del Metrobús ubicado en la Ciudad de México, que dieron lugar a decisiones de tipo estratégico y operacional, con el fin de optimizar el funcionamiento de la red y de minimizar los tiempos de recorrido. Para resolver dicho problema, se propuso instalar un servicio de rebases a través de las líneas en las que puede ser dividida la línea 1, lo que conllevaría a la reestructuración de las estaciones; en especial, en el tramo central, donde se encuentran más próximas unas de otras y de aquellas poco concurridas. Es decir, con poca afluencia de usuarios.

Corregir la frecuencia de los autobuses, a lo largo de la Línea 1 del Metrobús, es otra solución a la problemática planteada, incluyendo el rebase mencionado anteriormente. Esto implicaría la ampliación a un segundo carril y el comienzo de operaciones, no desde las terminales, sino desde las estaciones centrales, con el fin de aumentar la eficiencia en el servicio. La idea principal es aumentar la fluidez. Al haber menos paradas se reducen los tiempos de los trayectos y los tiempos de espera iniciales. También se espera que este aumento en la fluidez, compense los tiempos de espera, en los diferentes trasbordos.

El problema fue tratado desde la perspectiva de plantear un modelo, que busque diseñar, de manera óptima, las líneas en las que puede ser dividida la línea 1 y la asignación de los vehículos disponibles a cada una de ellas. Todo esto para dar servicio a los usuarios, no sólo desde los tramos iniciales, sino a lo largo de la línea; satisfaciendo la demanda solicitada, mejorando los tiempos totales de viaje, los tiempos de los trayectos y los tiempos de espera; en especial durante las horas pico del servicio. La metodología de la solución, que se propuso para resolver el problema estocástico, se basó en técnicas metaheurísticas. Inicialmente, se empleó un enfoque basado en procedimientos constructivos, con diferentes objetivos, para obtener una solución inicial. Y posteriormente, se utilizaron procedimientos de mejora, como la búsqueda local y la búsqueda tabú, basados en movimientos vecinales.

Se llevaron a cabo varios experimentos computacionales, para probar la efectividad de los algoritmos propuestos y para evaluar el desempeño de los diversos procedimientos incluidos en cada uno. Se diseñaron, implementaron y analizaron a fondo, las diferentes técnicas. Entre ellas, un algoritmo constructivo (descompuesto en diferentes fases), un procedimiento de búsqueda local, un procedimiento de búsqueda tabú y un procedimiento multiarranque, que combina el algoritmo constructivo, con el procedimiento de búsqueda tabú.

En el procedimiento de búsqueda local, siempre se cambia de la solución actual, a una solución vecina mejor. El procedimiento finaliza cuando no hay soluciones vecinas, que mejoren la actual. Es decir, se pretende conseguir la mejor de entre las soluciones posibles alcanzables, en un tiempo razonable. Los movimientos considerados para generar los vecindarios fueron: insertar una estación en la línea (1), eliminar la estación de la línea (2), cambiar la estación de una línea a otra (3), cambiar un autobús de una línea a otra (4) y cambiar simultáneamente una estación y un autobús de una línea a otra (5). Este último, se realizará solamente si, con los movimientos anteriores, no se consigue mejorar la situación actual.

La utilización del metaheurístico búsqueda tabú permite movimientos a una solución, aunque no sea tan buena como la actual, se pueda escapar de los óptimos locales y continuar estratégicamente la búsqueda de soluciones que sean mejores. Para esto se supone, en cada iteración, un cambio de la solución actual, a una solución vecina mejor. Cabe destacar que, en los movimientos definidos anteriormente, se suponen una o varias de las siguientes acciones: insertar una estación de una línea (1, 3 y 5), eliminar una estación de una línea (2, 3 y 5), quitar un autobús de una línea (4 y 5) y añadir un autobús a una línea (4 y 5).

Se diseñaron distintas fases, que se utilizaron para observar la calidad de las soluciones obtenidas. En las dos primeras fases, no hay ninguna estación (excepto las de índice 0 y n-1) que estén en más de una línea. Es decir, tras las fases A y B, cada estación intermedia pertenece exactamente a una línea. Por otro lado, la tercera tiene como objeto, asegurar que todas las estaciones estén cubiertas por algún autobús; en la cual sólo se asigna uno por línea. Se analizaron varios aspectos, la capacidad para mejorar las soluciones iniciales de partida y la influencia de las soluciones iniciales en las soluciones finales, obtenidas por la búsqueda local. El camino más eficaz para encontrar mejores soluciones iniciales fue la variedad en la asignación de autobuses en las líneas. Ésta se obtuvo por aleatoriedad y por penalización de frecuencias, dejando abierta la posibilidad de distintas combinaciones, experiencias y análisis, con las fases de este procedimiento constructivo o con otros similares.

Asimismo, entre los principales retos que enfrenta el sistema de transporte BRT se encuentran: satisfacer la necesidad de desplazamiento de las personas, lograr que el transporte público sea más atractivo que el automóvil, promover la integración entre los distintos medios de transporte (entre ellos, el no motorizado como ciclistas y peatones) y que sean de alta calidad. Son diversos los atractivos para los usuarios. Entre ellos, la posibilidad de lograr menor congestión, mejorar la calidad de vida, fomentar el desarrollo urbano y la inclusión social, centrándose principalmente en la reestructuración de la calidad urbana y en las necesidades de la gente. Pese a lo anterior, existen diversos obstáculos a vencer. Entre ellos, la baja intermodalidad entre los distintos sistemas de transporte, las

bajas velocidades del transporte público frente al transporte privado y la urgencia de la construcción de las redes de los corredores prioritarios, para este tipo de transporte. Es importante que un sistema de transporte considere los valores y el contexto local; para lograr que los usuarios se identifiquen con él.

Considerado como una innovación de transporte público, el sistema BRT se ha utilizado para mejorar la movilidad; incentivando el desarrollo urbano, a través de la transformación de las ciudades, logrando una planificación ordenada del entorno. Los tomadores de decisiones deben tener cuidado al trasladar dicho modelo de transporte a otros contextos. Esto es cierto, ya que en ocasiones, se puede incurrir en la puesta en práctica de un transporte inferior (tecnológica y logísticamente).

Para evitar lo anterior, el sistema BRT, debe ser un sistema con un buen diseño y alta calidad; y requiere de una serie de políticas públicas, que tomen en cuenta el contexto económico de la ciudad en cuestión. Invertir en dicho tipo de sistemas de transporte conlleva a mayores beneficios, dado los menores costes que implica su infraestructura, en comparación con otros medios. Es importante el impulso a la creación de las políticas públicas adecuadas, para desarrollar proyectos urbanos, que fortalezcan el transporte público masivo e integrado y que mejore la movilidad urbana.

Otro aspecto importante a considerar es el análisis de la demanda potencial de pasajeros para el sistema BRT. Ésta es considerada la base técnica del desarrollo del diseño del sistema. Las estimaciones de la demanda son fundamentales para el diseño del sistema y para la planificación de las operaciones. El hecho de saber dónde y cuándo requieren los usuarios de los servicios de transporte, ayudará a formar un sistema basado en las necesidades del usuario. Los tomadores de decisiones deben de tomar en cuenta la mayor cantidad de pasajeros posible, con el objetivo de poner en marcha un sistema que tome en cuenta la demanda de usuarios; así como también la importancia de una determinada ruta para los pasajeros y para que el sistema forme una red, ya que de lo contrario la demanda solo será una fracción de su potencial real. Es importante que el sistema sea diseñado con la suficiente capacidad para manejar no solamente la demanda presente, sino la demanda

futura estimada razonable, tomando en cuenta las velocidades vehiculares, un posible aumento de pasajeros y la posibilidad de establecer capacidad adicional. A su vez, la estimación de demanda también es requerida para optimizar las operaciones (uso adecuado de los autobuses, correcto trazo del ancho de vía, infraestructura adecuada de las estaciones y monitoreo de las frecuencias), tomando en cuenta las necesidades de los viajes en la ciudad.

Pese a los puntos a tomar en cuenta para la implementación de un sistema BRT y evitar conflictos de operación, el Metrobús ha presentado diversos problemas de planeación desde su puesta en marcha. Entre ellos los niveles muy elevados de ocupación, la poca accesibilidad, la baja calidad del servicio al usuario y la ineficiencia en la programación de frecuencia de autobuses, entre otros. Estos han sido producto del éxito del sistema; que es visto, desde la perspectiva del usuario, como un mal servicio.

Existen diversas maneras para corregir dichos problemas, tales como utilizar tecnología de punta (en los autobuses, como en los centros de control), brindar capacitación a los empleados, presionar para generar políticas públicas y tomar en cuenta las soluciones expuestas en este trabajo, las cuales ayudarían a optimizar el funcionamiento del sistema, permitiendo mayor movilidad para los usuarios y generando un mayor margen de vida al sistema.

La propuesta de división de la línea 1 en diferentes líneas provocaría mayor fluidez en la operación, disminuyendo el tiempo total de viaje y el número de trasbordos, lo que conllevaría a menores costes por parte de Metrobús y una mejor percepción por parte de los usuarios. Existen otras posibilidades dentro del análisis de optimización, como tomar en cuenta distintos objetivos con el fin de racionalizar la toma de decisiones referente a la operación, entre ellos los referentes a los costes (por combustible consumido, autobuses usados), a asuntos ecológicos (emisiones) o cuestiones laborales (planificación de turnos de trabajo de los conductores).

Sin duda alguna, el Metrobús ha sido víctima de su propio éxito. Se le ha considerado un modelo innovador en México, por su forma de transportar a la población y de solucionar los problemas de movilidad; sobre todo en las grandes urbes, donde el problema de la congestión es una constante. Sin embargo, tiene mucho por mejorar. Sobre todo en lo referente a la operación. Lo expuesto en la presente investigación, es una propuesta para lograr que el Metrobús se convierta en una solución viable a largo plazo y en gran escala.

### **8.3 Reflexiones**

Dado el contexto actual, es necesaria la optimización del transporte BRT para brindar un servicio de calidad a los clientes. Los problemas concurrentes en su operación, presentan una elevada complejidad, derivada, entre otros, de los objetivos que se abordan: mejorar el nivel de servicio (eliminando los tiempos de recorrido) y disminuyendo el número de trasbordos.

Hasta el momento no ha habido propuestas sólidas respecto a la solución de problemas de operación de este tipo de servicios. Los tomadores de decisiones que han llevado a cabo el diseño de la planificación de este medio de transporte no han logrado llevar a cabo soluciones que alcancen el nivel al que se puede llegar con las herramientas descritas en la presente investigación. La incorporación y desarrollo de herramientas científicas y técnicas puede ser crítica en la mejora del nivel de las soluciones obtenidas y en la eficacia de este tipo de servicios de transporte.

Las diferentes metaheurísticas y sus aplicaciones a problemas biobjetivo, resultan ser un campo muy estudiado en los últimos años y, por ello, se justifica su aplicación a los problemas presentados en este medio de transporte, que aunque presenta aspectos muy similares con otros estudiados en la literatura científica, posee algunas características que lo hacen diferente. Tratándose de un problema real, entendemos que es extrapolable a otros entornos sectoriales y geográficos (con sus propias especificidades) con las adaptaciones correspondientes. Particularmente, la búsqueda tabú ha demostrado tener buen desempeño en problemas de rutas.

El desarrollo de heurísticas aplicadas a problemas biobjetivo, ha estado mayoritariamente dominado por métodos poblacionales-evolutivos, ya que en problemas multiobjetivo, se buscan conjuntos de soluciones, más que soluciones individuales. En la literatura científica existen aplicaciones exitosas resueltas mediante este tipo de algoritmos.

El esfuerzo de diseñar un método ad hoc puede dar lugar, como en este caso, a conjuntos de soluciones significativamente mejores. Concretamente, la búsqueda tabú ha demostrado su buen desempeño en problemas de rutas y de transporte urbano.

#### **8.4 Trabajo futuro**

En el desarrollo de esta investigación se ha considerado que la manera de optimizar el servicio prestado por el sistema BRT debe de llevarse a cabo por medio de la mejora en la calidad en el servicio prestado a los usuarios, a través de la disminución de los tiempos de recorrido y modificando el número de trasbordos de más a menos. De esta forma, se ha plantado un problema real, que puede ser aplicable a muchas situaciones y medios de transporte y para hacer más aplicable y útil las herramientas desarrolladas, se ha de hacer un esfuerzo en intentar añadir a los modelos el mayor número de elementos reales, con el riesgo de complicar los modelos resultantes.

El modelo considerado en el epígrafe de extensiones y limitaciones sugiere futuras líneas de investigación posibles y aplicaciones a otros modelos, desde un punto de vista conceptual como metodológico, las cuales no son aplicables exclusivamente a un medio de transporte como el BRT sino que podrían ser aplicables a otras alternativas tales como el Metro, línea regular de autobuses, ferrocarril y tranvía entre otros.

En la actualidad, brindar un servicio de transporte que suponga mayor rapidez y calidad es percibido de una manera positiva para los usuarios, sobre todo en una ciudad tan congestionada como lo es la Ciudad de México. En este sentido, se entiende que las soluciones deben contemplar distintos objetivos (tiempos de recorrido, número de estaciones, número de trasbordos, diseño de líneas en el sistema, entre otros).

La combinación de problemas de optimización de los servicios de transporte, planificación de redes de transporte, diseño de rutas, satisfacción de la demanda y brindar un servicio de calidad al usuario, se entienden como retos interesantes y desafiantes desde distintos puntos de vista. Por otra parte, un estudio que puede resultar interesante, es respecto al desarrollo de otras metodologías de solución, sobre todo para problemas biobjetivo.



## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



Aarts, E., Lenstra, J.K. *“Local Search in Combinatorial Optimization”*, Wiley, Chinchester, 1997.

Aarts, E., Korst, J. *“Simulated Annealing and Boltzman Machines Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing (Wiley Series in Discrete Mathematics and Optimization)”*, John Wiley and Sons Inc., Nueva York, 1989.

Abdulaal, M., LeBlanc, L.J. *“Continuous equilibrium network design models”*, Transportation Research Part B, 13, 1, pp. 19–32, 1979.

Alamilla, D. *“Aprendizaje de la matemática basado en la resolución de problemas”*, Universidad Pedagógica Nacional Unidad 231, Gobierno del Estado de Quintana Roo, México, 2010.

Disponible en: <http://biblioteca.coqcyt.gob.mx/bvic/Captura/upload/APRENDIZAJE-DE-LA-MATEMATICA-TESIS.pdf>.

Allsop, R.E. *“Estimating the traffic capacity of a signalized road junction”*, Transportation Research, 6, pp. 245–255, 1972.

Álvarez, C., Cotonieto, I., Franco K., Hernández, T., Lugo, R., Páez L. *“Una nueva alternativa de transporte en el Distrito Federal: corredor estratégico Metrobús Insurgentes”*, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, México, 2005.

Disponible en:

<http://envia.xoc.uam.mx/tid/investigaciones/M/Metrobus%20Insurgentes.doc>.

Baaj, M.H., Mahmassani, H.S. *“An AI-based approach for transit route system planning and design”*, Journal of Advanced Transportation 25, 2, pp. 187–210, 1991.

Baaj, M.H., Mahmassani, H.S. *“Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks”*. Transportation Research Part C, 3, pp. 31–50, 1995.

Beausoleil, P. “*MOSS: Multiobjective Scatter Search Applied to Non-linear Multiple Criteria Optimization*”, European Journal of Operational Research, 169, 2, pp. 426-449, 2006.

Bobo Romero, E. “*Olimpiadas provinciales de Matemáticas: algunas ideas para resolver problemas*”, Asociación Castellano y Leonesa de Educación Matemática Miguel de Guzmán, 2009.

Disponible en:

[http://www.academia.edu/3362078/La\\_conquista\\_de\\_Lisboa\\_violencia\\_militar\\_y\\_comunidad\\_política\\_en\\_Portugal\\_1578-1583](http://www.academia.edu/3362078/La_conquista_de_Lisboa_violencia_militar_y_comunidad_política_en_Portugal_1578-1583)

Boyce, D.E. “*Urban transportation network-equilibrium and design models: recent achievements and future prospects*”, Environment and Planning A, 16, 1, pp. 1445–1474, 1984.

Bull, A. “*Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo*”, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Chile, 2003.

Disponible en: <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/9/13059/cue-87.pdf>.

Caballero, R., Gonzalez M., Guerrero, F., Molina, J., Paralera, C. “*Solving a Multiobjective Location Routing Problem with a Metaheuristic Based on Tabu Search: Application to a Real Case in Andalusia*”, European Journal of Operational Research 177, 3, pp. 1751-1763, 2007.

Campos, V. “*Problemas de rutas*”, Universidad de Valencia, 2004.

Disponible en: <http://www-eio.upc.es/~elena/Tutoriales/rutas.pdf>.

Cantarella, G.E., Pavone, G, Vitetta, A. “*Heuristics for urban road network design: lane layout and signal settings*”, European Journal of Operational Research, 175, 3, pp. 1682–1695, 2006.

Cantarella, G.E., Vitetta, A. “*The multi-criteria road network design problem in an urban area*”, *Transportation*, 33, 6, pp. 567–588, 2006.

Carrese, S., Gori, S. “*An urban bus network design procedure*”, *Applied Optimization* 64, pp. 177–195, 2002.

Ceccaroni, L. “*Inteligencia artificial: búsqueda local*”, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2009.

Ceder, A., Israeli, Y. “*Design and evaluation of transit routes in urban networks*”, En: *Proceedings of the 3rd International Conference on Competition and Ownership in Surface Passenger Transport*, Ontario, Canada, 1993.

Chakroborty, P. “*Genetic algorithms for optimal urban transit network design*”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 18, pp. 184–200, 2003.

Cipriani, E., Gori, S., Petrelli, M. “*Transit Network Design: A Procedure and an Application to a Large Urban Area*”, *Transportation Research Part C*, 20, 1, pp. 3-14, 2012.

Clarke, G., Wright, J.R. “*Scheduling of Vehicle Routing Problem from a Central Depot to a Number of Delivery Points*”, *Operations Research* Vol. 12, 4, pp. 568-581, 1964.

Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal. “*Informe especial sobre el derecho a la movilidad en el Distrito Federal*”, Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México, México, 2013.

Disponible en: [http://directorio.cd hdf.org.mx/libros/2013/movilidad\\_2013.pdf](http://directorio.cd hdf.org.mx/libros/2013/movilidad_2013.pdf).

Cordeau, F., Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G., Sormany, J. S. “*New Heuristics for the Vehicle Routing Problem*,” En: A. Langevi and D. Riopel, Eds., *Logistics Systems: Design and Optimization*, Springer, Nueva York, pp. 279-297, 2005.

Correa, C., Bolaños, R., Molina, A. “*Algoritmo Multiobjetivo NSGA-II Aplicado al Problema de la Mochila*”, Scientia et Technica Año XIV, Universidad Tecnológica de Pereira, 2, 39, pp. 206-211, 2008.

Cotta, C. “*Una visión general de los algoritmos meméticos*”, Procedimientos Metaheurísticos en Economía y Empresa. España, ASEPUMA, 1ª Edición, pp. 139-166, 2007.

Crespo, E., Martí, R., Pacheco, J. “*Procedimientos metaheurísticos en economía y empresa*”, Asociación Española de Profesores Universitarios de Matemáticas para la Economía y la Empresa, Valencia, 2007.

Dantzig, G., Ramser, J. “*The Truck Dispatching Problem,*” Management Science, 6, 1, pp. 80-91, 1959.

Davis, L. (ed.). “*Handbook of Genetic Algorithms*”, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1991.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. “*A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA II*”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6, 2, pp. 182–197, 2002.

Deng, T., Nelson, J. “*The Impact of Bus Rapid Transit on Land Development: A Case Study of Beijing, China*”, World Academy of Science, Engineering and Technology, 4, 6, pp. 949-959, 2010.

Disponible en: <http://waset.org/publications/14464/the-impact-of-bus-rapid-transit-on-land-development-a-case-study-of-beijing-china>.

Desaulniers, G., Hickman, M.D. “*Chapter 2: Public Transit*”, En: Barnhart, C., Laporte, G. (Eds.), Handbooks in Operations Research and Management Science, 14, pp. 69–127, 2007.

Díaz, A., Glover, F., Ghaziri, H.M., Gonzalez, J.L., Laguna, M., Moscato, P., Tseng, F.T. **“Optimización Heurística y Redes Neuronales”**, Paraninfo, Madrid, 1996.

Dijkstra, E.W. **“A note on two problems in connexion with graphs”**, Numerische Mathematik, pp. 1269-1271, 1959.

Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorni, A. **“The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents”**, IEEE, Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B, 26, 1, pp. 29-41, 1996.

Dowland, K., Adenso, B. **“Diseño de heurística y fundamentos del recocido simulado”**, Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, 7, 19, pp. 34-52, 2003.

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92571906>

Duhalde, M.E., Gonzalez, M.T., Cedrón, S., Trotta, V. **“Encuentros cercanos con la matemática”**, Buenos Aires: Aique, 2a. edición, 1997.

Duque, D., Robledo, J. **“Análisis de la influencia que tienen las paradas del transporte público sobre el flujo de saturación en el centro de Bogotá”**, Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2009.

Duque, G. **“Introducción a la economía del transporte”**, Universidad Nacional de Colombia, 2007.

Disponible en: [http://www.oocities.org/duque\\_gonzalo/int-ecnm-transp.pdf](http://www.oocities.org/duque_gonzalo/int-ecnm-transp.pdf).

Fan, W., Machemehl, R. **“Optimal Transit Route Network Design Problem with Variable Transit Demand: Genetic Algorithm Approach”**, Journal of Transportation Engineering, 132, 1, pp. 40-51, 2006.

Farahani, R., Miandoabchi, E., Szeto, W.Y., Rashidi, H. “*A Review of Urban Transportation Network Design Problems*”, European Journal of Operational Research, 229, 2, pp. 281-302, 2013.

Feo, T., Resende, M., “*A probabilistic heuristic for a computationally difficult Set Covering Problem*”. Operations Research Letters, 8, pp. 67-71, 1989.

Fjellstrom, K. “*Bus Rapid Transit in China*”, Built Environment, 36, 3, pp. 363-374, 2010.

Flores, M.L. “*Propuesta de un modelo de calidad de servicio para el transporte público Metrobús*”, Tesis de Maestría, Escuela Superior de Comercio y Administración Unidad Santo Tomás, Instituto Politécnico Nacional, México, 2012.

Friesz, T.L. “*Transportation network equilibrium, design and aggregation: key developments and research opportunities*”, Transportation Research Part A: General, 19, 5–6, pp. 413–427, 1985.

Friesz, T.L., Anandalingam, G., Mehta, N.J., Nam, K., Shah, S.J., Tobin, R.L. “*The multiobjective equilibrium network design problem revisited: a simulated annealing approach*”, European Journal of Operational Research, 65, 1, pp. 44–57, 1993.

Gallo, G., Pallottino, S. “*Shortest Path Algorithms*”, Annals of Operations Research, pp. 133 -179, 1988.

García Martínez, C. “*Algoritmos genéticos locales*”, Tesis de Doctorado, Universidad de Granada, España, 2008.

García, I. “*Un enfoque metaheurístico para un problema de ruteo con flexibilidad en las fechas de entrega*”, Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 2010.

Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, Y, “*Metaheuristics for the VRP*”, En: P. Toth and D. Vigo, Eds., The Vehicle Routing Problem, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, Filadelfia, pp. 129-154, 2002.

Gendreau, M., Cordeau, J-F., Laporte, G., Potvin, J-Y., Semet, F. “*A Guide to Vehicle Routing Heuristics*”, Journal of the Operational Research Society, EUA, 53, 5, pp. 512-522, 2002.

Glover, F. “*A Template for Scatter Search and Path Relinking*”, Artificial Evolution, Lecture Notes in Computer Science, 1363, Hao, J. K., E. Lutton, E. Ronald, M. Schoenauer, and D. Snyers (Eds.), Springer, pp. 13-54, 1998.

Glover, F. “*Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence*”, Computers and Operations Research, 13, 5, pp. 533-549, 1986.

Glover, F. “*Heuristics for Integer Programming Using Surrogate Constraints*”, Decision Sciences, 8, 1, pp. 156-166, 1977.

Glover, F., Laguna, M. “*Tabu Search*”, Kluwer Academic Publisher, Boston, 1997.

Gobierno del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. “*Encuesta origen-destino 2007*”, Secretaría de Transportes y Vialidad, 2007.

Disponibile en:

[http://inigo.bicitekas.org/wp-content/uploads/2013/07/2007\\_Encuesta\\_Origen\\_Destino\\_INEGI.pdf](http://inigo.bicitekas.org/wp-content/uploads/2013/07/2007_Encuesta_Origen_Destino_INEGI.pdf).

Goldberg, D. “*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*”, Addison-Wesley Publishing Co., Boston, 1989.

Gómez, J.R. *“Diseño de un sistema de recogida de residuos urbanos: enfoque multiobjetivo y uso de metaheurísticos”*, Tesis de Doctorado, Universidad de Burgos, España, 2010.

Gravel, M., Price, W., Gagné, C. *“Scheduling Continuous Casting of Aluminium Using a Multiple Objective Ant Colony Optimization Metaheuristic”*, European Journal of Operational Research, 143, 1, pp. 218-229, 2002.

Guihaire, V., Hao, J. *“Transit network design and scheduling: a global review”*, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 42, 10, pp. 1251–1273, 2008.

Guntsch, M., Middendorf, M. *“Solving Multiobjective Permutation Problems with Population Based ACO”*, Proceedings of the Second International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 2636, Fonseca, C.M., Fleming, P.J., Zitzler, E., Deb, K., Thiele, L. (Eds.), Springer, pp. 464-478, 2003.

Hajek, B. *“Cooling Schedules for Optimal Annealing”*, Mathematics of Operations Research, 13, 2, pp. 311-329, 1988.

Hasselström, D. *“Public Transportation Planning”*, Tesis de Doctorado, Departamento de Administración de Empresas, Universidad de Gothenburg, Suecia, 1981.

Hernández, H. *“Procedimientos exactos y heurísticos para resolver problemas de rutas con recogida y entrega de mercancía”*, Tesis doctoral, Universidad de la Laguna, 2005.  
Disponible en: <http://hhperez.webs.ull.es/Thesis%20of%20Hipolito%20Hernandez.pdf>.

Hinebaugh, D. *“Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making”*, U.S. Department of Transportation, EUA, 2009.

Disponible en:

<http://www.nbrti.org/docs/pdf/High%20Res%20CBRT%202009%20Update.pdf>.

Holland, J. *“Adaptation in Natural and Artificial Systems”*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

Huamán, E. *“El método heurístico”*, Colectivo Pedagógico Escuela Abierta, 2008.

Disponible en:

<http://www.scribd.com/doc/6132277/MATEMATICA-EL-METODO-HEURISTICO>.

Institute for Transportation and Development Policy. *“Guía de planificación de sistemas BRT”*, EUA, 2010.

Disponible en: <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/01.-BRT-Guide-Spanish-complete.pdf>.

Instituto de Desarrollo Urbano. *“Transmilenio como estrategia para solucionar el problema de movilidad”*, Alcaldía Mayor de Bogotá, 2012.

Disponible en: [http://www.idu.gov.co/web/guest/construcciones\\_transmilenio](http://www.idu.gov.co/web/guest/construcciones_transmilenio).

Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México. *“Diseño de estaciones de sistemas BRT”*, ITDP, México, 2012.

Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México. *“Perspectivas de crecimiento de la red de Metrobús y transporte integrado del Distrito Federal a 2018: resumen ejecutivo”*, 2012.

Disponible en:

<http://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Resumen-ejecutivo-Metrob%C3%BAs-2013-2018.pdf>.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). *“Censo de población y vivienda 2010”*.

Disponible en:

<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/default.aspx>.

Iracheta, A. *“La necesidad de una política pública para el desarrollo de sistemas integrados de transporte en grandes ciudades mexicanas”*, El Colegio Mexiquense, 2011. Disponible en: <http://www.revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/526/565>.

Israeli, Y., Ceder, A. *“Transit Route Design Using Scheduling and Multiobjective Programming Techniques”*, En: Proceedings of the Sixth International Workshop on Computer Aided Scheduling of Public Transport, Springer, pp. 56-75, 1993.

Jozefowicz, N., Semet, F., Talbi, E-G. *“Multiobjective Vehicle Routing Problems”*, European Journal of Operational Research, 189, 2, pp. 293-309, 2007.

Kepaptsoglou, K., Karlaftis, M. *“Transit route network design problem: review”*, Journal of Transportation Engineering, 135, 8, pp. 491–505, 2009.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P. *“Optimization by Simulated Annealing”*, Science, 220, 4598, pp. 671-680, 1983.

Kumar, S., Panneerselvam, R. *“A Survey on the Vehicle Routing Problem and its Variants”*, Intelligent Information Management, 4, 3, pp. 66-74, 2012. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4236/iim.2012.43010>

Laguna, M., Martí, R. *“Scatter Search”*, Methodology and Implementations in C. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.

Laporte, G. *“The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms”*, European Journal of Operational Research, 59, 3, pp. 345-358, 1992.

Lee, Y., Vuchic, V.R. *“Transit network design with variable demand”*, Journal of Transportation Engineering, 131, 1, pp. 1–10, 2005.

Levinson, H.S., Zimmerman, S., Clinger, J., Gast, J., Rutherford, S., Bruhn, E. ***“TCRP Report 90. Bus Rapid Transit. Volume 2: Implementation Guidelines”***, Transportation Research Board, EUA, 2003.

Litman, T. ***“Gestión de la movilidad para México: beneficios para su desarrollo económico”***, Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México (ITDP), México, 2012.

Disponible en:

<http://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Gestion-de-la-movilidad-Todd-Litman.pdf>.

Luna, F. ***“Metaheurísticas avanzadas para problemas reales en redes de telecomunicaciones”***, Tesis de Doctorado, Universidad de Málaga, España, 2008.

Magnanti, T.L., Wong, R.T. ***“Network design and transportation planning: models and algorithms”***, Transportation Science, 18, 1, pp. 1–55, 1984.

Malagón, C. ***“Búsqueda heurística”***, Área de Computación e Inteligencia Artificial, Universidad de la Rioja, 2012.

Disponible en: [http://www.nebrija.es/~cmalagon/ia/transparencias/busqueda\\_heuristica.pdf](http://www.nebrija.es/~cmalagon/ia/transparencias/busqueda_heuristica.pdf).

Martí, R. ***“Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria”***, Departament D'estadística I Investigació Operativa, Facultat De Matemàtiques, Universidad de Valencia, 2003.

Disponible en: <http://www.uv.es/~rmarti/paper/docs/heur1.pdf>.

Martínez, A. ***“Modelos reales de problemas simultáneos de rutas y planificación. Equilibrio entre prioridades del cliente y reducción de costes”***, Tesis de Doctorado, Universidad de Burgos, España, 2013.

Mauttone, A., Urquhart, M.E. ***“A route set construction algorithm for the transit network design problem”*** Computer & Operations Research, 36, 8, pp. 2440–2449, 2009.

Mauttone, A. *“Optimización de recorridos y frecuencias en sistemas de transporte público urbano colectivo”*, Tesis de Maestría, Universidad de la República, 2005.

Disponible en: <http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/tesis/tesis-mauttone.pdf>.

Melián, B., Glover, F. *“Introducción a la Búsqueda Tabú”*, Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, 19, pp. 29-48, 2003.

Disponible en:

[http://www.researchgate.net/profile/Fred\\_Glover/publication/28076117\\_Bsqueda\\_Tab/links/0fcfd50e607e93a116000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Fred_Glover/publication/28076117_Bsqueda_Tab/links/0fcfd50e607e93a116000000.pdf)

Miandoabchi, E., Farahani, R.Z. *“Optimizing reserve capacity of urban road networks in a discrete network design problem”*, Advances in Engineering Software, 42, 12, 1041-1050, 2011.

Miandoabchi, E., Daneshzand, F., Szeto, W.Y., Farahani, R. *“Multiobjective Discrete Urban Road Network Design”*, Computers and Operations Research, 40, 10, pp. 2429-2449, 2013.

Michalewicz, Z. *“Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1992.

Migdalas, A. *“Bi-level programming in traffic planning: models, methods and challenge”*, Journal of Global Optimization, 7, 4, pp. 381–405, 1995.

Molina, J., Laguna, M., Martí, R., Caballero, R. *“SSPMO: A Scatter Tabu Search Procedure for Non-Linear Multiobjective Optimization”*, INFORMS Journal of Computing, 19, 1, pp. 91-100, 2007.

Moreno, J.A., Mladenović, N. *“Búsqueda por entornos variables para planificación logística”*, Procedimientos Metaheurísticos en Economía y Empresa. España, ASEPUMA, 1ª Edición, pp. 239-263, 2007.

New Delhi BRT System, 2014.

Disponibile en: [http://www.dimts.in/Projects\\_Bus-Rapid-Transit.aspx](http://www.dimts.in/Projects_Bus-Rapid-Transit.aspx).

New York City Global Partners. “*Best Practice: Metrobús Bus Rapid Transit System*”, NYC Global Partners’ Innovation Exchange, 2010.

Disponibile en: <http://www.nyc.gov/globalpartners/innovationexchange>.

Newell, A., Shaw, J.C., Simon, H.A. “*Empirical Explorations with Logic Theory Machine: A Case Study in Heuristics*”, Computers and Thought, Edward A. Feigenbaum and Julian Feldman (eds.), McGraw-Hill Book Company, Nueva York, pp. 109-133, 1963.

Newell, G. “*Some issue relating to the optimal design of bus lines*”, Transportation Science, 13, 1, pp. 20–35, 1979.

Nicholson, T. “*Optimization in industry, optimization techniques*”, Longman Group Limited, EUA, 1971.

Ortúzar, J.D., Willumnsen, L. “*Modelling Transport*”, John Wiley and Sons, 1996.

Osman, I.H., Kelly, J.P. “*Metaheuristics, An Overview*”, I.H Osman & J.P. Kelly (eds), Metaheuristics Theory and Applications, Boston: Kluwer Academic Publishers, pp. 1-21, 1996.

Osman, I.H., Kelly, J.P. “*Meta-heuristics: Theory and Applications*”, Kluwer Academic Publisher, Boston, 1996.

Pacheco, J., Álvarez, A., Casado, S., González-Velarde, J.L. “*A Tabu Search Approach to an Urban Transport Problem in Northern Spain*”, Computers and Operations Research 36, 3, pp. 967-979, 2009.

Paquette, C., Delaunay, D. “*Movilidad residencial y política de redensificación: el área central de la Ciudad de México*”, Revista Eure, 35, 105, pp. 95-112, 2009.

Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/eure/v35n105/art05.pdf>.

Parragh, S., Schmid, V. “*Hybrid column generation and large neighborhood search for the dial-a-ride problem*”, Computers & Operations Research, 40, pp.490-497, 2013.

Pattnaik, S.B., Mohan, S., Tom, V.M. “*Urban bus transit network design using genetic algorithm*”, Journal of Transportation Engineering, 124, 4, pp. 368–375, 1998.

Ponnaluri, R. “*Sustainable Bus Rapid Transit Initiatives in India: The role of Decisive Leadership and Strong Institutions*”, World Conference on Transport Research Society (WCTRS), Transport Policy, 18, 1, pp. 269-275, 2011.

Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X10001071>.

Puchinger, J., Raidl, G. “*Combining metaheuristics and exact algorithms in combinatorial optimization: A survey and classification*” En: Mira, J., Alvarez, J. (ed), Proceedings of the First International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation, 3562, pp. 41-53, 2005.

Reeves, C. “*Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*”, Blackwell Scientific Publications, 1993.

RIT, 2014.

Disponible en: <http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br>.

Rodríguez, C. “*Algoritmos heurísticos y metaheurísticos para el problema de localización de regeneradores*”, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, Universidad Rey Juan Carlos, España, 2010.

Russell, S., Norvig, P. *“Inteligencia Artificial un Enfoque Moderno”*, Prentice Hall Hispanoamérica, México, 1996.

Russo, F., Vitetta, A. *“A topological method to choose optimal solutions after solving the multi-criteria urban road network design problem”*, *Transportation*, 33, 4 pp. 347-370, 2006.

Schmid, V. *“Hybrid Large Neighborhood Search for the Bus Rapid Transit Route Design Problem”*, *European Journal of Operational Research*, 238, 2, pp. 427-437, 2013.  
Disponibile en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221714003142>

Schmid, V., Doerner, K. *“Examination and operating room scheduling including optimization of intrahospital routing”*, *Transportation Science*, 1, pp. 59-77, 2013.

Serafini, P. *“Simulated Annealing for Multiobjective Optimization Problems”*, En *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Multiple Criteria Decision Making*, 1, pp. 87-96, 1992.

Sistema de Transporte Metrobús.

Disponibile en:

<http://www.metrobus.df.gob.mx>.

<http://www.metrobus.df.gob.mx/mapa.html>.

Spiess, H., Florian, M. *“Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks”*, *Transportation Research B*, 23B, 2, pp. 83-102, 1989.

Thomas, E. *“Bus Rapid Transit”*, Presentación en The Institute of Transportation Engineers Annual Meeting. Chicago, 2001.

Transmilenio, 2014.

Disponibile en: <http://www.transmilleno.net.co/mapa.html>.

Turner, M., Kooshian, C., Winkelman, S. “*Case Study: Colombia’s Bus Rapid Transit (BRT) Development and Expansion*”, Mitigation Action Implementation Network (MAIN), 2012.

Disponible en:

<http://www.ccap.org/docs/resources/1080/Colombia-case%20study-final.pdf>.

Vidal, R.V. “*Applied Simulated Annealing*”, Springer-Verlag, Berlin, 1993.

Webster, F.V., Cobbe, B.M. “*Traffic signal*”, Road research technical paper no.56, London, Her Majesty's Stationery Office, 1966.

Williams, J.W.J. “*Algorithm 232: Heapsort*” Communication of the ACM, 7, pp. 347-348, 1964.

Wong, S.C. “*On the reserve capacities of priority junctions and roundabouts*”, Transportation Research Part B, 30, 6, pp. 441-453, 1996.

Wright, L. “*Latin American Bus Ways: Moving People Rather Than Cars*”, Natural Resources Forum, JNRF 25, 2, pp. 1-28, 2001.

Wu, J.H., Florian, M., Marcotte, P. “*Transit Equilibrium Assignment: A Model and Solution Algorithms*”. Transportation Science, 28, 3, pp. 193-203, 1994.

Xiong, Y.E., Schneider, J.B. “*Transportation network design using a cumulative genetic algorithm and neural network*”, Transportation Research Record, 1364, pp. 37–44, 1993.

Yang, H., Bell, M.G.H. “*A capacity paradox in network design and how to avoid it*”, Transportation Research Part A, 32, 7, pp. 539–545, 1998.

Yang, H., Bell, M.G.H. “*Models and algorithms for road network design: a review and some new developments*”, Transport Reviews, 18, 3, pp. 257–278, 1998.

Yang, H., Wang, JYT. “*Travel time minimization versus reserve capacity maximization in the network design problem*”, Transportation Research Record, 1783:17–26, 2002.

Yang, Z.Z., Yu, B., Cheng, C. “*A Parallel Ant Colony Algorithm for Bus Network Optimization*”, Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, 22, 1, pp. 44-55, 2007.

Zamora Colín, U., Campos Alanís, H., Calderón Maya, J.R. “*Bus Rapid Transit (BRT) en ciudades de América Latina, los casos de Bogotá (Colombia) y Curitiba (Brasil)*”, Quivera, 15, pp. 101-118, 2013.

Disponibile en: <http://www.redalyc.org/pdf/401/40128395007.pdf>.

Zanakis S.H., Evans J.R. “*Heuristic Optimization: Why, When and How to use it*”, Interfaces, 11, 5, pp. 84-91, 1981.

Zhu, X., Hughes, C. “*Guangzhou, China Bus Rapid Transit Emissions Impact Analysis*”, The Institute for Transportation and Development Policy (ITDP), China, 2011.

Ziyou, G., Yifan, S. “*A reserve capacity model of optimal signal control with user-equilibrium route choice*”, Transportation Research Part B, 36, 4, pp. 313–323, 2002.