UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Proyecto fin de carrera

Diseño de un sistema de autobús de alto nivel de servicio (BHLS) en la ciudad de Santander

Autor

IÑAKI GASPAR ERBURU

Director

BORJA ALONSO OREÑA

Santander, 2013

ÍNDICE

1. RESÚMEN 4
2. MOBILIDAD URBANA Y PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO 6
2.1. La movilidad urbana 6
2.1.1. La movilidad en las ciudades 6
2.1.2. La circulación y el espacio urbano 7
2.1.3. ¿Porque es importante incrementar el uso del transporte público? 8
2.2. Planificación del Transporte Público 10
2.2.1. Topología de redes y rutas de transporte publico 10
2.2.2. La determinación del recorrido de autobuses: Filosofía general 16
2.2.3. Las técnicas de planificación de redes de Transporte Público 21
3. JUSTIFICACION DEL PROYECTO 27
4. SISTEMAS BRT 28
4.1. Características de los Sistemas BRT 28
4.2. Sistemas BRT en el mundo 45
4.2.1. Sistemas BRT en América Latina 47
4.2.2. Sistemas BRT en Europa 54
4.2.3. Sistemas BRT en Asia y Oceanía 58
5. COSTES DE EXPLOTACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO 63
5.1. Costes de operación del transporte público. 63
5.2. Coste de construcción de las paradas. 65
5.3. Evaluación de los costes unitarios 65
6. APLICACIÓN PRÁCTICA: CASO DE SANTANDER 73
6.1. Descripción del caso de estudio. 73
6.1.1. Situación y emplazamiento 73
6.1.2. Población 75
6.1.3. Economía 76
6.1.4. Transportes 77
6.2. Caracterización de los usuarios y de los potenciales usuarios del Transporte Público. 84
6.2.1. Caracterización de los usuarios del transporte público. 86

6.2.2. Caracterización de los potenciales usuarios del transporte público. 92
7. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA 100
7.1. Filosofía de la propuesta 100
7.1.1. Situación 1 100
7.1.2. Situación 2 103
7.1.3. Situación 3 104
7.1.4. Situación 4 104
7.2. Modelización del proyecto 105
7.2.1. Calibración y validación del Modelo Macroscópico de Santander. 105
7.2.2. Modelización a nivel micro 108
7.3. Justificación de las medidas adoptadas 113
7.3.1. Creación del carril bus 113
7.3.2. Aumento de la capacidad de las paradas 121
7.3.3. Priorización semafórica 136
7.3.4. Medidas complementarias 141
7.4. Resultados 142
7.4.1. Evaluación de los costes de explotación 145
8. COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS FÉRREOS Y EL BRT 148
9. CONCLUSIONES 153
10. REFERENCIAS 158

1. RESÚMEN

El desarrollo del tejido urbano, el cambio del modo de vida, la flexibilidad del coche particular combinado con una oferta de transporte público en ocasiones insuficiente, ha ocasionado que Santander, al igual que la gran mayoría de las ciudades, haya experimentado en los últimos años un incremento del número de vehículos que circulan por el centro de la ciudad. Este aumento, ha originado un gran número de problemas, entre los que se encuentran: congestión del centro de la ciudad, aumento de los tiempos de viaje, tanto del transporte público como del privado; un alto nivel de contaminación atmosférica y sonora y un incremento de los accidentes.

Los desplazamientos que se realizan generalmente son cortos, se efectúan con motores fríos, lo que multiplica exponencialmente el consumo de combustible, al igual que las emisiones de gas carbónico y otros agentes responsables del cambio climático, se estima que el transporte urbano produce el 40% de las citadas emisiones.

La Unión Europea, a través de recomendaciones y medidas reglamentarias, propone básicamente dos soluciones al respecto. **Primera**: el uso de combustibles poco contaminantes, como: biodiesel, GNC (gas natural comprimido), hidrógeno, electricidad, etc., pretende que para el año 2020, el consumo de estas energías alcance el 20% del total. **Segunda:** fomentar las buenas prácticas, mediante soluciones atractivas de transporte, que constituyan una alternativa real al automóvil privado, líneas de metro, tranvías y autobuses públicos de alta capacidad, que utilicen pasillos prioritarios.

Este proyecto de investigación incluye ambas recomendaciones, por un lado pretende reducir el tráfico de vehículos privados por el centro de la ciudad, fomentando el uso del transporte público. Para ello se ha elegido desarrollar dentro de Santander, el **corredor Hospital de Valdecilla-Universidad de Cantabria**, pasando por la calle San Fernando, Ayuntamiento, Paseo de Pereda y por el túnel de Tetuán, que es el eje principal de la ciudad y que puede ser muy atractivo desarrollar un sistema BRT (del inglés “BUS RAPID TRANSIT”, también conocido como “Autobuses de alto nivel de prestación o servicio” o como “Autobuses de alto nivel de capacidad”) a lo largo de este corredor; por otro lado, los vehículos de este conjunto de líneas utilizarán alguno de los combustibles antes descritos.

Para que los usuarios potenciales dejen de usar sus vehículos y comiencen a utilizar el transporte público, es necesario que éste alcance los niveles de comodidad, calidad y rapidez que satisfagan sus expectativas. Los nuevos autobuses deben de ser de acceso fácil para las personas con movilidad reducida. Es esencial que el transporte público se adapte a los cambios de la sociedad: los desplazamientos se reparten cada vez más a lo largo del día, con lo que podría desaparecer la separación entre horas punta y horas valle. Por tanto, gran parte de la investigación consistirá en analizar la demanda potencial, sus usos y costumbres y determinar qué medidas son necesarias implementar, para satisfacer al ciudadano.

El proyecto consiste en analizar la implantación de un sistema BRT en el corredor antes indicado. Un sistema BRT es aquel sistema de transporte público de media y alta capacidad en superficie, basado en autobuses o trolebuses. Cualquier sistema BRT que se precie debe contar con una serie de características imprescindibles como son: construcción de carriles exclusivos para los autobuses, mejora de los sistemas de operación, utilización de autobuses de alta capacidad, etc., y otras que se deberán estudiar en cada caso, para ver si son necesarias o no.

Para realizar dicho estudio se realizarán simulaciones sobre un modelo híbrido macro-micro, calibrado a tal efecto, y que permitirán cuantificar los beneficios sociales del proyecto así como las diferentes estrategias de operación que se vayan implementando. En este sentido se emplearán las nuevas tecnologías ITS para implementar medidas de priorización semafórica y control de intervalos en tiempo real.

2. MOBILIDAD URBANA Y PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO

2.1. La movilidad urbana

2.1.1. La movilidad en las ciudades

Los últimos cincuenta años se han caracterizado por un gran crecimiento de la población urbana y consecuentemente de la circulación automovilística. Según estimaciones recientes desde la actualidad hasta el 2020 la movilidad en áreas urbanas aumentara de un 50%.

Este aumento tendrá lugar esencialmente en las grandes aglomeraciones urbanas, en particular en los países en vías de desarrollo sufren ya importantes problemas de tráfico y consecuentemente elevado número de accidentes y el incremento en los niveles de contaminación atmosférica derivados del uso abusivo del vehículo privado fundamentalmente.

La urbanización se ve cada vez más modelada por el automóvil. Muchas familias eligen vivir en el campo o en general fuera de las ciudades, poseyendo varios coches para satisfacer sus necesidades de movilidad. Las consecuencias de esta expansión urbana son bien conocidas: disolución de las relaciones sociales del vecindario, dependencia del automóvil, incremento de los desplazamientos y aumento en los gastos de transporte.

Asimismo, el incremento del nivel de vida viene acompañado de una fuerte tendencia a la peri urbanización y a la dependencia creciente respecto del automóvil. Cuando los ciudadanos cambian las ciudades por barrios periféricos, los desplazamientos, efectuados principalmente en coche, son más largos y más frecuentes.

En particular el coste total de los desplazamientos está inversamente ligado a la densidad de población; ósea cuanto más baja es la densidad, más elevado es el coste. Este coste varía entre un 5% del producto interior bruto (PIB) para ciudades como Tokio y Múnich y el 15% para las ciudades norteamericanas de baja densidad.

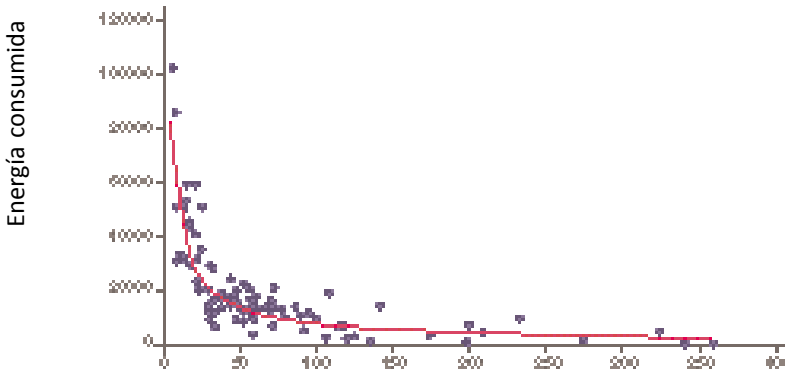


Figura 1: Relación Densidad de Población – Energía Consumida (Fuente UITP Millenium Cities database).

En las zonas urbanas de baja densidad, el coche es el medio de transporte dominante y el coste del transporte público es elevado. La base de datos "Millenium Cities Database for Sustainable transport" preparada por la UITP y la Murdoch University, demuestra que el coste para la colectividad del transporte de personas, expresado en tanto por ciento del PIB, es menor cuanto más elevados son la densidad y la proporción de los desplazamientos efectuados a pie, en bicicleta y en transporte público.

2.1.2. La circulación y el espacio urbano

La circulación automovilística ocupa cada vez más un codicioso espacio urbano. Como se puede demostrar fácilmente, para transportar 50.000 personas por hora y sentido de marcha, se necesitan 175 metros de anchura de carretera para los coches, o 35 metros de anchura para los autobuses o solamente 9 metros para una línea de metro o ferrocarril.

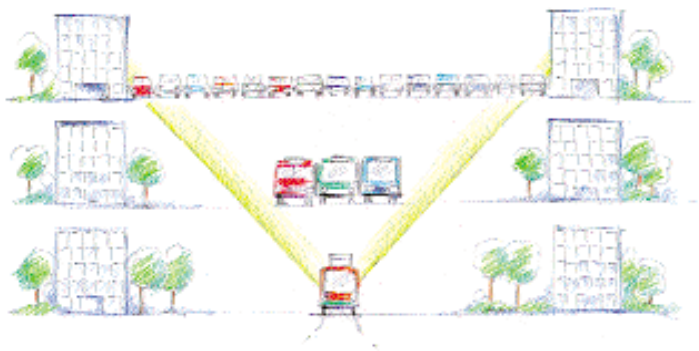


Figura 2: El transporte público y el espacio urbano (UITP, 2001).

Otro elemento que contribuye a ocupar espacio público es el estacionamiento de los coches. Para trabajar en las oficinas, los empleados necesitan el mismo espacio que para aparcar su coche el cual permanece en el aparcamiento durante todo el día con productividad "cero", mientras los empleados tienen una jornada productiva.

Todos los modos de transporte utilizan espacio para desplazarse y estacionar durante un cierto tiempo. Estos consumos de espacio pueden agregarse utilizando una misma unidad de medida: "Espacio * Tiempo", expresado en m^2 * Hora.

El modo de transporte que consume más espacio es el vehículo privado. Por ejemplo, un recorrido domicilio-trabajo en coche consume 90 veces más espacio que el mismo trayecto efectuado en metro y 20 veces más si se utiliza el autobús o el tranvía.

2.1.3. ¿Porque es importante incrementar el uso del transporte público?

Como ya se ha dicho en la introducción, las ciudades que han sabido conservar las actividades comerciales y culturales de su centro histórico se ven amenazadas por la congestión y la degradación del medio ambiente. Mientras que las conexiones interurbanas e intercontinentales son cada vez más rápidas, los desplazamientos en la ciudad siguen siendo lentos.

La congestión es un obstáculo capital para el desarrollo económico y cultural de nuestras ciudades. El uso incontrolado del automóvil en la ciudad daña la salud de los habitantes, que sufren el ruido y la contaminación, y contribuye al agotamiento de las energías no renovables y a las emisiones de gas de efecto invernadero.

El desarrollo sostenible de las ciudades ya no es solamente un tema de debate teórico, sino que reclama también medidas concretas para hacerse realidad. Los ciudadanos se hacen a la idea de que su futuro y el de sus hijos dependen de las decisiones y de las acciones de los responsables políticos de la planificación urbana y de los transportes.

Para garantizar la accesibilidad a las actividades urbanas a todos los ciudadanos, incluidos los que no tienen coche, y mejorar la calidad de vida en la ciudad, es necesario limitar el uso del automóvil y dar la prioridad al transporte público, a los peatones y a los ciclistas.

Se han conseguidos progresos y podemos observar algunos buenos ejemplos de regeneración de los centros, fieles a la herencia cultural de las ciudades, de la que sus ciudadanos han podido disfrutar y de la que se sienten orgullosos, pero estos esfuerzos deben ser continuados y ampliados. (UITP, 2001)

Por ejemplo, el uso excesivo del coche en la ciudad se ve incrementado por el hecho de utilización gratuita de las carreteras y por el precio poco elevado del estacionamiento. Además los automovilistas no pagan los costes externos que generan: atascos, contaminación atmosférica y ruido.

Aunque el número de coches aumenta progresivamente, no todos los hogares están motorizados. En particular en los países en vía de desarrollo, la mayoría de la población depende de los transportes públicos. Incluso en los países desarrollados, el 25% de los hogares no tiene coche y más del 50% de los ciudadanos no tiene coche a su disposición para desplazarse en ciertos momentos del día. Los escolares, las personas mayores, aquellos que no tienen permiso de conducir, al igual que las personas de renta baja, necesitan el transporte colectivo para desplazarse.

Además, queda la esperanza que cada día más ciudadanos elegirán no tener coche por razones ecológicas si viven en una ciudad con un buen servicio de transporte público.

2.2. Planificación del Transporte Público

2.2.1. Topología de redes y rutas de transporte publico

Una red de autobuses, está formada por un sistema de líneas de autobús, paradas, unidades terminales y el resto de la infraestructura necesaria para el movimiento seguro y eficiente de autobuses y pasajeros.

Contrariamente a las redes de los otros modos de transporte masivos, una red de autobús tiene la gran ventaja de ser flexible y no requiere infraestructura permanente para el movimiento de sus vehículos (G.A. Giannopoulos, 1990). Por lo tanto, es suficiente una determinación de rutas e instalaciones necesarias a lo largo de ellas para el uso por parte de los pasajeros (paradas de autobús, señales etc.).

Por tanto, la forma de estas redes influye no solo en el servicio proporcionado al público sino también en la operación correcta del sistema. Entre otros factores el diseño de las líneas influye en:

- El *"cubrimiento"* de la zona, por ejemplo los porcentajes de la zona que se encuentran dentro de una cierta distancia aceptable de las líneas de autobús.
- El *"número"* de los trasbordos requeridos para los pasajeros entre líneas de autobús para que los pasajeros puedan llegar a sus destinos finales.
- Los horarios y las frecuencias de autobús, y por consiguiente la espera media en paradas de autobús.
- La ubicación y la operación de las terminales.

La forma de la red de calle del área urbana, donde el sistema de autobús funciona, no condiciona necesariamente la forma de la red de autobús.

Las formas principales de las redes de autobús se detallan a continuación.

A. Radial

En este tipo de red de autobús todas o casi todas las líneas más importantes se "irradian" desde un punto central (Figura 3a).

El objetivo es desempeñar los corredores más importantes de movimiento hacia y desde cierto foco. Las líneas de bus en este tipo de red tienen generalmente un punto final

en el área central y uno en la periferia, pero esto generalmente ocasiona congestión en el centro y la necesidad de encontrar un espacio para ubicar las terminales de autobús. Por otra parte las líneas pueden pasar por el centro y terminar en la periferia, pero en este caso las líneas son más largas y sus operaciones más inestables.

Las ventajas de una red radial son: minimización de los trasbordos (ya que la mayoría de los pasajeros se van hacia el punto "focal"), la explotación de corredores a alta densidad de movimiento y, el reforzar las funciones del punto focal.

Las desventajas incluyen la contribución a un incremento de la congestión en el área central, especialmente donde se encuentran las unidades terminales de las líneas y la cobertura muy irregular de las zonas (las áreas centrales quedaran cubiertas por muchas líneas, mientras que los suburbios no se cubren adecuadamente).

Se recomienda el uso de redes radiales de autobús en las áreas urbanas más pequeñas (por debajo de los 100.000 habitantes) donde relativamente hay poco riesgo de congestión en el centro y las necesidades para los movimientos periféricos son relativamente menores. Para áreas urbanas más grandes se recomienda un tipo de red mixta.

B. Ortogonal o a Cuadricula

Este tipo de red de transporte público se caracteriza por líneas puestas a lo largo de una cuadrícula ortogonal como se muestra en la Figura 3b. Algunas de las líneas pasan por el centro pero muchas no y el objetivo principal es brindar un "cubrimiento" uniforme de la demanda.

Algunas de las ventajas principales de este tipo de redes es el hecho de que el sistema de líneas y rutas es más intuitivo y comprensible por el público y que las zonas están uniformemente cubiertas por el sistema de autobuses.

Las desventajas, quizás el gran número de trasbordos, y como consecuencia de ello, el hecho de que las frecuencias (y por lo tanto, el número requerido de autobuses) tienen que ser incrementadas para compensar la pérdida del tiempo en los trasbordos.

Este tipo de red es recomendada para áreas urbanas más grandes donde pueden ser factibles frecuencias elevadas de los autobuses.

C. Mixtas

Este tipo de red es una mezcla de los señalados anteriormente, ósea contiene red ortogonal y red radial. Las figuras 3c y 3d muestran ejemplos de este tipo de red. La primera figura muestra unas líneas troncales y unas líneas alimentadoras, en que hay varias líneas troncales que pasan por el centro y varias líneas alimentadoras radiales que conectan los suburbios.

La Figura 3c hace referencia a un área urbana y a sus suburbios, mientras que la Figura 3d representa una situación en que la red de autobús desempeña un área urbana central tanto como sus áreas satélite adyacentes o pueblos.

El tipo de red mixta de autobús es probablemente la más usada, simplemente porque ninguna área urbana puede ser a la perfección adecuada para cualquiera de los tipos previos.

En la literatura se pueden encontrar definiciones de otros tipos de redes de transporte público, como por ejemplo la lineal, la radial modificada, la territorial.

Por ejemplo, la red radial modificada es una red radial con algunas rutas circulares, mientras que la territorial es una mezcla entre un tipo de red que desempeña las áreas circundantes y los suburbios como queda representado en la Figura 3d y generalmente combinado con "Puntos de transferencia de tiempo", como por ejemplo puntos donde los horarios de paso de los autobús han sido coordinados para minimizar el tiempo de espera en los transbordos.

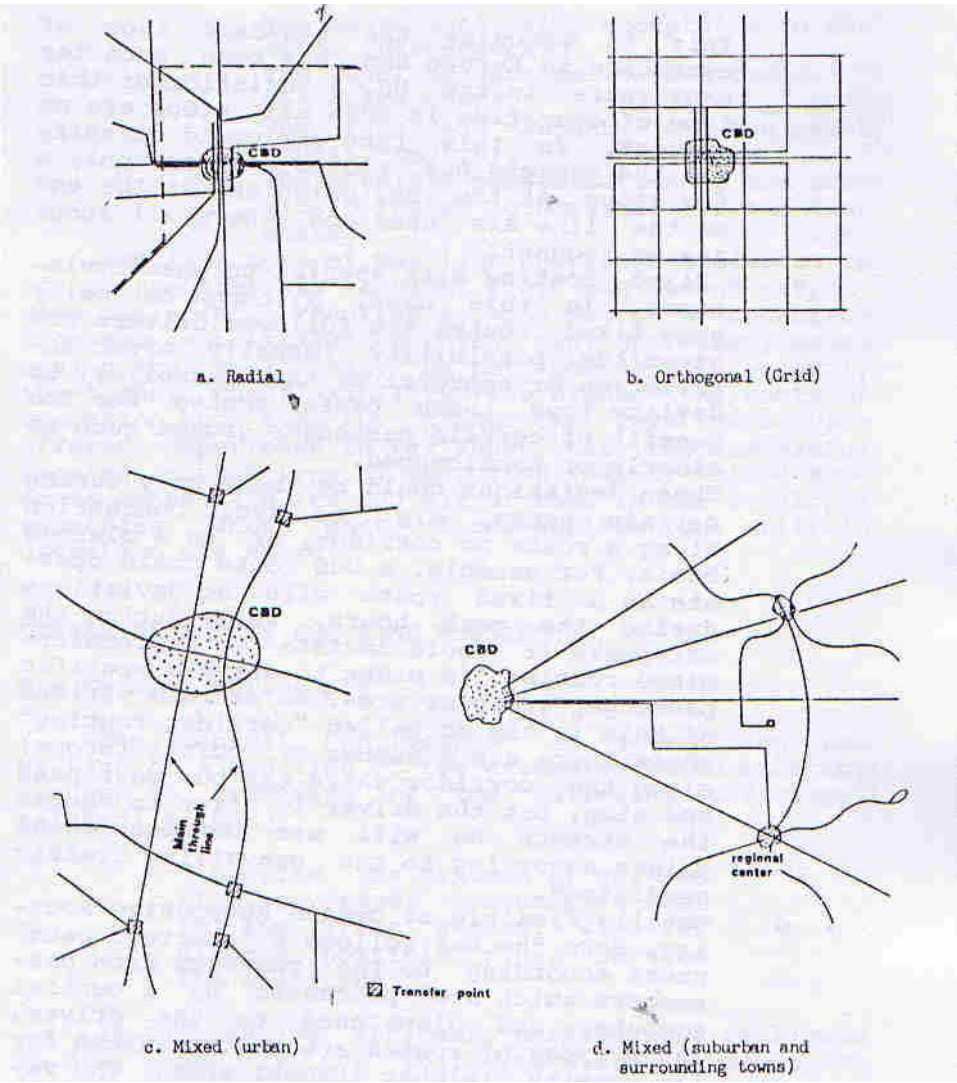


Figura 3: Tipos de rutas de autobús (G.A. Giannopoulos, 1990).

Otra clasificación es la proporcionada por Molinero, A. R, (1.996), que individualiza otros 4 tipos de redes:

R*utas diametrales*: al desarrollarse la red de transporte y crecer la ciudad, un primer ajuste que se realiza es la conexión de dos rutas radiales, que conforman una nueva ruta que pasa por el centro y conecta dos extremos de la ciudad. Con esta conexión se logra una mejor distribución del servicio y evita la concentración de terminales en los centros históricos o de actividades, lográndose una mayor eficiencia. Sin embargo debe existir un balance de la demanda a ambos extremos de la ruta, ya que en caso contrario la operación y la asignación de la oferta se dificulta.

R*utas tangenciales*: son rutas que pasan a un lado del centro de actividades o centro histórico de una ciudad. Únicamente es recomendable en zonas de poca demanda.

R*utas con lazo en un extremo*: son rutas de configuración radial en las que se presenta un lazo en uno de sus extremos lo que induce a considerar una sola terminal. Es necesaria una coordinación para lograr un mismo intervalo en la zona del lazo.

R*utas circulares*: sirven de conexión con las rutas radiales, permitiendo una mejor distribución de los usuarios. En este caso, se eliminan las terminales. A su vez, pueden presentar rutas en arco o segmentos de círculo que no pasan por el centro.

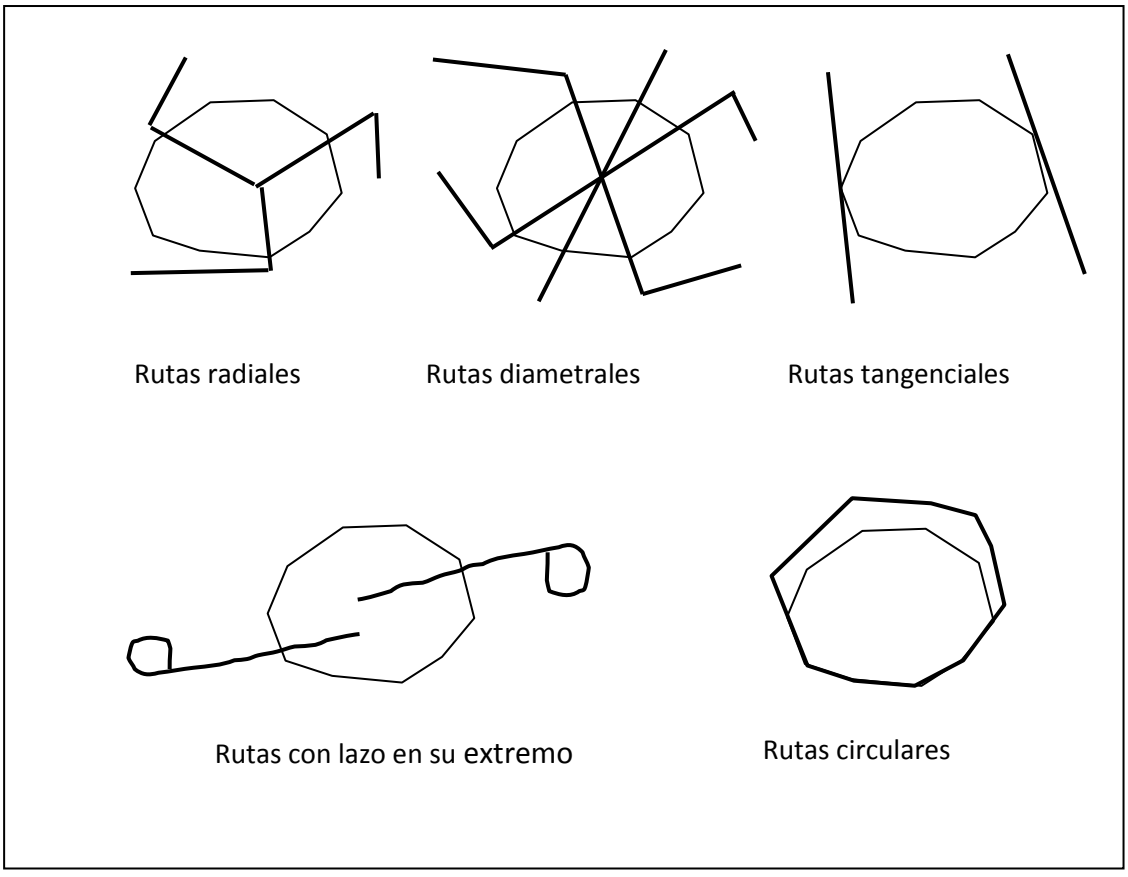


Figura 4: Tipos de rutas (Molinero, A. R., 1.996).

Por lo general, la ruta radial permite cargar un buen número de pasajeros en sus extremos, a la vez que esta se acerca al centro de la ciudad. Por el contrario, la ruta circular

mantiene una carga uniforme a lo largo de todo su recorrido. La ruta diametral atrae usuarios a partir de su extremo, llegando a una sección de máxima demanda antes de llegar al centro de actividades, donde descarga una cantidad de usuarios y vuelve a cargar después para distribuirlos a lo largo del resto de su ruta.

Así como se podrían distinguir diferentes clases de redes de autobús, resulta que las rutas de autobús o las líneas que constituyen estas redes pueden clasificarse, con respecto a los períodos de *tiempo de operación*, de la siguiente manera:

1. De *operación ininterrumpida*, por ejemplo operar constantemente durante todos el día y noche (o la mayor parte de la noche), o
2. De *operación "part time*" por ejemplo operar durante parte de las horas normales de operación.

Con respecto al tipo de ruta, se pueden distinguir los siguientes 4 tipos de operación:

A. De ruta fija. En este tipo de operación la ruta y las paradas de autobús son fijas y los conductores están obligados a seguir la ruta bajo todas las circunstancias. Por supuesto este tipo de operación no impide los cambios planificados en rutas y paradas provocados por obras muy importantes o emergencias, o modificaciones ordinarias de la red.

B. De ruta fija, pero con algunas paradas obligatorias y otras a solicitud del pasajero. En este tipo, el conductor sigue una ruta fija pero no se detiene en todas paradas. Hay varias paradas donde tiene que parar y otras donde para sólo si hay pasajeros esperando o que quieren bajar del autobús.

Este tipo de operación se está utilizando actualmente en Europa y ha sido durante años puesta en práctica en Estados Unidos. Una variante de este tipo de operación se obtiene cuando todas las paradas son a solicitud. En este caso se podrían clasificar todas las rutas de autobús, donde solamente son utilizadas pocas paradas al principio y al final de la línea y donde todas paradas son a solicitud.

C. De ruta fija con desviaciones para propósitos especiales. En este caso, aunque se utilicen básicamente algunas rutas fijas, los conductores tienen la posibilidad (generalmente

después de instrucción del gerente de trafico) para desviarse de estas rutas básicas para el beneficio de ciertos grupos de pasajeros como ancianos o minusválidos.

D. De ruta totalmente flexible o con recorrido a la demanda. Aquí el autobús persigue una "Ruta más breve" de acuerdo con las solicitudes de los pasajeros que están procesadas por un ordenador central y cuyo recorrido es proporcionado al conductor. Estas clases de operación son más adecuadas para las áreas de densidad bajas.

2.2.2. La determinación del recorrido de autobuses: Filosofía general

La "Filosofía" general para determinar el recorrido de una nueva línea o la ampliación de una existente según Giannopoulos (1989) puede ser expresado por el siguiente lema:

"Suministre el mejor servicio posible (en términos de cubrimiento de la demanda, así como de frecuencias etc.) con el mínimo coste de operación posible"

Una alternativa en muchos casos es:

"Suministrar el mejor servicio a las áreas servidas compatiblemente a los recursos disponibles (incluyendo las subvenciones)".

Una ayuda muy importante en la práctica puede ser la utilización de varios criterios específicos o Standard para la planificación de la ruta, incluyendo la determinación de su recorrido, y su operación. Los principales criterios pueden ser:

A. La existencia de una demanda mínima de viajeros

Una nueva línea tiene que tener una cierta de justificación en relación a su rentabilidad así como considerar fundamentalmente la cantidad de la pasajeros (demanda) potenciales. Lógicamente los ingresos de la nueva línea deben cubrir los gastos de operación al menos. Por tanto la regla básica en este caso podría ser tener el número mínimo de pasajeros que permita cubrir el coste de operación.

Con respecto a la "Demanda", se pueden utilizar datos de situaciones similares, o un cálculo basado en la obtención del número de las personas que estarían dentro de alcance de la nueva línea.

El cálculo del coste de operación de la nueva ruta puede obtenerse con un modelo de

asignación de coste simple sobre la base de los datos de otras líneas parecidas. Algunos operadores han establecido reglas sencillas que son aplicadas con regularidad para valorar una nueva línea.

B. Creación de líneas "Rectas".

Una línea de autobús debe de ser lo más posible cercana a una línea recta. Una "Desviación" es un cambio de dirección muy importante a forma por ejemplo de círculo o “G” etc. Esto da la sensación al pasajero que están malgastando su tiempo.

Sin embargo, en determinadas situaciones son inevitables para servir áreas más amplias y evitar reforzar con una segunda línea y contener de esta manera los costes de operación.

En estos casos existen ciertas reglas para minimizar los impactos negativos de las desviaciones sobre pasajeros. Estas "Reglas" son las siguientes:

1. El tiempo máximo de viaje en autobús por pasajero, no debe exceder los 30 minutos incluyendo el tiempo gastado en las paradas.
2. La desviación no debe aumentar la longitud total de la línea de más del 20 % (preferentemente) o 30 % (máximo) respecto al mismo viaje efectuado en auto.
3. El tiempo promedio de viaje por pasajero en la línea de autobús específica no debe de ser mayor de más del 25 %, en comparación con el mismo tiempo de viaje si la desviación no fuera hecha.
4. En cada línea, el número máximo de desviaciones es preferentemente una o como máximos dos.
5. La posible desviación debe ser colocada preferentemente en los tramos finales de la ruta y no en el medio.

Los puntos desde (1) a (4), tienen que ser verificados simultáneamente. En otras palabras si uno de estos puntos no fuera satisfecho, la desviación no se debe de hacer o debe ser ajustada en consecuencia.

C. Evitar la superposición de líneas de autobús

Cuando partes relativamente extensas de un área pueden ser servidas por más de una línea autobús, para los mismos destinos, entonces las líneas se superponen.

Como una regla general, la superposición de líneas de autobús debe ser evitada, especialmente en áreas no céntricas. Sin embargo, esto no siempre es posible, especialmente en las calles con alta densidad de tráfico o densamente pobladas, cosa que ocurre generalmente en áreas urbanas centrales de la mayoría de las ciudades.

Las líneas de autobuses se pueden superponer en las áreas centrales o densamente pobladas con las siguientes condiciones:

1. Las líneas que se superponen tienen que tener intervalos coordinados y superiores a 3 minutos en la hora punta, y 6-8 minutos en las horas valle. Cuando los intervalos entre autobuses estén por debajo de estas cifras, hay que tomar medidas para reducir el número de líneas que se solapan y desviarlas para desempeñar otras áreas con menos intensidad de tráfico.
2. El coeficiente medio de ocupación de las secciones donde hay superposición de las líneas, tiene que ser mayor del 60 %.
3. La longitud de la sección, sobre las que se pueden producir los solapes, no debe ser superior al 50 % de la longitud total de cada una de las líneas.

Los puntos tratados son particularmente aplicables cuando las líneas que se solapan utilizan las mismas paradas. Cuando esto ocurre surgen problemas especiales y satisfacer estas condiciones ayuda a evitar serios problemas de congestión y demoras.

D. Otros criterios

Otros criterios pueden ser:

1. Obviamente los caminos que van a ser utilizados por las líneas de autobús deben tener firmes adecuados y sus características geométricas deben admitir un movimiento cómodo para autobuses, incluyendo la posibilidad de adelanto para los vehículos privados etc.

2. El ancho de los carriles utilizados por los autobuses debe ser al menos 3 metros. Las aceras deben de tener ancho suficiente (al menos 2 metros) para permitir la colocación de las paradas de autobús.
3. La longitud total de una línea de autobús no debe exceder de cierto límite. Una línea larga favorece demoras grandes. Un límite razonable, dado a menudo en la literatura, es que el tiempo total de viaje (en ambas direcciones) no debe sobrepasar las 2 horas (preferentemente), o 2.5 horas (máximo) para líneas simplemente urbanas. Este límite es incrementado para líneas que conectan el área urbana con suburbios o áreas urbanas periféricas.
4. Para razones del uso más fácil y memorización de la red por el viajero, es recomendable que ambas las direcciones de viaje para la misma ruta deban seguir los mismos recorridos. Si esto no es posible (por ejemplo el uso de calles de único sentido), es aconsejable que las dos direcciones de viaje para la misma ruta no estén separadas más de 300-400 metros entre sí.
5. Finalmente, y sin ignorar las condiciones en (2) sobre la longitud de líneas, se recomienda que las líneas de autobús pasen por el centro urbano y no terminen allí. La existencia de unidades terminales de autobús en los centros de la ciudad causa la congestión y daña el ambiente, sin mejorar el servicio proveído al público considerablemente.

Una variable importante en la etapa del proceso de planificación es la *Densidad de las redes de autobuses.*

"*La densidad*" expresa el cubrimiento de la zona en términos de longitud de la red, y en general su distribución geográfica en el espacio. La densidad de una red de autobús, es una función del desarrollo de una zona, de la forma y de la densidad de los itinerarios principales, de las frecuencias del servicio a lo largo de los recorridos, de las distancias a pie etc. El objetivo principal en este caso es proveer al menos una línea de autobús que proporcione una distancia a pie adecuada para ser alcanzada por todas las partes del área urbana.

La densidad de la red de autobús es el resultado final de un complexo proceso de planificación de rutas y de diseño que dependen de múltiples factores.

Para áreas urbanas con alta densidad de desarrollo la distancia máxima entre rutas paralelas de autobús no debe exceder los 800 metros, para tener distancias a pie máximas de 400 metros (o tiempos a pie de aproximadamente 5 minutos).

Para áreas centrales, estas distancias son por supuesto mucho más pequeñas, especialmente cuando la forma de la red de autobús es radial.

Para áreas urbanas de baja densidad o en los suburbios, donde las distancias a pie aceptables son generalmente más grandes, la distancia máxima entre líneas de autobús puede llegar a 1600 metros o más.

Las distancias citadas son simplemente indicativas, y dependen principalmente de las condiciones locales. Por ejemplo, si la topografía tiene pendientes altas, las distancias a pie deben de ser más pequeñas y por lo tanto, la distancia aceptable máxima entre líneas es también más pequeña. Igualmente es válido si se considera el entorno existente en relación con la inocuidad para los peatones de intrusión visual, o incluso las condiciones de clima predominantes. Otro factor, que afectará en última instancia la distancia máxima entre las líneas de una red de autobús, es la frecuencia del servicio de autobús en estas líneas.

En general, la experiencia demuestra que, para dar servicio a determinados niveles de demanda de pasajeros, es preferible tener un número pequeño de líneas con frecuencia alta que más líneas con baja frecuencia.

La distancia entre rutas de autobús no es la única medida de densidad. Por un lado, ha de tenerse en cuenta las distancias a pie hasta las paradas y, sobre todo, en muchos casos, el concepto de distancia entre líneas no tan evidente y depende del tipo de configuración tal cual es el caso de configuraciones radiales de muchas redes.

Estos aspectos anteriores con respecto a la densidad pueden ser “afinados” teniendo en cuenta las distancias entre paradas de autobús. En este caso puede ser que una densidad "Razonable" de la red de autobús aquella en la que el 70-75 % de la población de una área urbana densamente poblada está dentro de la distancia 400 metros a pie a una parada de autobús. Para áreas a baja densidad de población, un 50-60 % de la población debe estar dentro de los 800 metros de una parada de autobús.

Finalmente, otra manera de expresar la "Densidad" de una red de autobús es la longitud media de red por kilómetro cuadrado del área de estudio. Esta es una expresión

usual de la densidad que se puede utilizar como indicador del cubrimiento total la zona por parte de la red de autobús.

Densidad de población por Km^2	Densidad de la red de autobuses (Km de red/ Km^2)
>4600	2.50
3900 - 4600	2.00
3000 – 3900	1.65
2300 – 3000	1.25
1500 – 2300	1.00
750 – 1500	0.60
< 750	0.30

Tabla 5: Relación entre densidad de población y densidad de la red de autobuses (G.A. Giannopoulos, 1990)

2.2.3. Las técnicas de planificación de redes de Transporte Público

La planificación de las redes de transporte colectivo, sea a nivel urbano o interurbano, presenta una elevada complejidad de modelización y computacional por múltiples razones, entre otras:

1. Dificultad en la elección y en la especificación de los objetivos de la planificación. Por ello se debe tener en cuenta frecuentemente, diferentes objetivos a veces contradictorios como por ejemplo el coste y la calidad del servicio a los usuarios, los costes y la eficiencia para la empresa y los costes y la eficacia para la colectividad.
2. Dificultad a la hora de modelizar el problema debido a la falta de homogeneidad y al gran número de variables y restricciones existentes.
3. Dificultad en la resolución de los modelos de optimización: función objetivo y restricciones no lineales, variables a veces discretas y otras a veces continuas, elevado número de variables, restricciones que no son fácilmente cuantificables, relativas a las elecciones de recorrido de los usuarios, etc.

Existen numerosos trabajos que han afrontado el problema de la planificación de redes de transporte colectivo, examinando para ello varios aspectos y utilizando muchos enfoques resolutivos. Tales trabajos pueden ser clasificados de diferentes maneras:

1. En función de variables de decisión del problema: trazados de las líneas, frecuencias del servicio, dimensión de los vehículos, etc.
2. En función del tipo de problema: empírico, simulación u optimización.
3. En función de los algoritmos utilizados para la resolución: heurísticos, exactos, meta-heurísticos, etc.
4. En función del tipo de sistema de transporte público a planificar: urbano, interurbano, a la demanda, etc.
5. En función de las hipótesis sobre la demanda: demanda elástica o demanda rígida.

A continuación se establece una clasificación de los principales trabajos de investigación existentes en función del enfoque resolutivo del problema; empírico, simulación y optimización.

Métodos empíricos

Los métodos empíricos han sido los primeros en ser utilizados; estos consisten fundamentalmente en un enfoque cualitativo, basado sobre experiencias pasadas del planificador o sobre las indicaciones de algunos organismos de control y, a veces, sobre los resultados de investigaciones sobre la demanda de movilidad. Para estimar los flujos de pasajeros sobre las diversas líneas, las redes generadas no se evalúan con la ayuda de modelos de asignación.

En la figura 6 se representa un esquema simplificado del funcionamiento de los métodos empíricos.

La mayor parte de estas metodologías consideran las recomendaciones elaboradas por las autoridades responsables del control y gestión de los sistemas de transporte a nivel gubernativo.

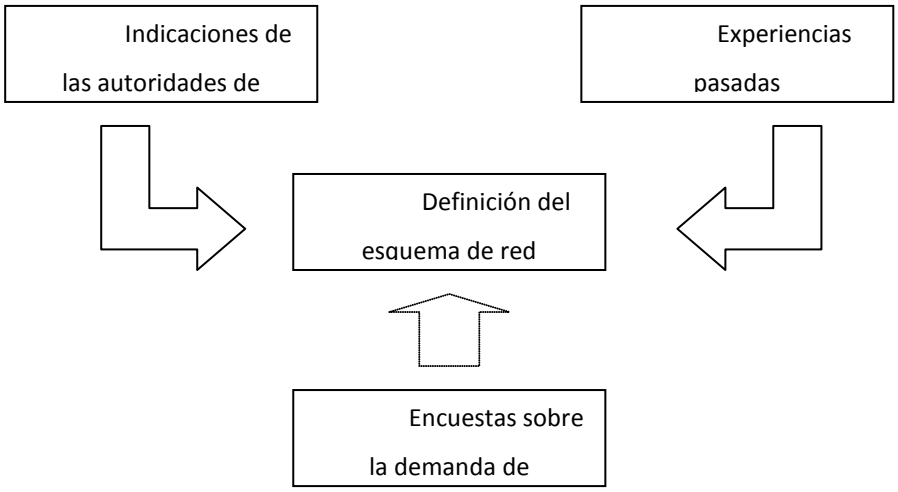


Figura 6: Esquema simplificado de los métodos empíricos (Russo et al., 2002)

Se describen a continuación las principales investigaciones relativas a los métodos empíricos.

El Department of the Environment and Welsh Office (1973) y Greater Glasgow Passenger Transport Executive and the Strathcycle Regional Council (1975) proponen una serie de directrices sobre el posicionamiento y distanciamiento de las paradas. No se proporcionan informaciones sobre los recorridos de las líneas ni sobre las frecuencias.

En CTP (1981) gran parte del trabajo contiene indicaciones sobre la planificación detallada de algunos elementos, por ejemplo, las paradas; proporcionándose asimismo indicaciones sobre cómo realizar variaciones en líneas ya existentes.

TRB (1980) es un manual que establece un procedimiento generalizado por la planificación de nuevas líneas de autobús, a nivel táctico/operativo; es sobre todo útil para modificar líneas ya existentes.

Faulks (1981) y London Transport (1976) proponen métodos para la planificación de redes de autobús o para la revisión de líneas existentes.

Hsu, Surti (1975, 1977) define un enfoque de tipo sistemático, considerando tres niveles de Planificación: origen y destino de la línea, tipología de la línea y recorrido.

Bursey et al. (1979) propone un método de planificación de red de autobús; realiza un primer intento de considerar los flujos sobre la red, en base a investigaciones sobre la demanda de movilidad.

Métodos de simulación

La difusión de ordenadores de elevada potencia de cálculo ha permitido el desarrollo de programas de simulación de los sistemas de transporte colectivo. Ello ha permitido el desarrollo de un notable número de métodos de planificación basados en la simulación del sistema de transporte.

Llegados a este punto, es necesario precisar que también los métodos de optimización simulan el sistema pudiendo calcular el valor de la función objetivo consecuente con una determinada configuración de oferta; dichos, en cambio, utilizan los resultados de la simulación dentro de un procedimiento tal que conduce de modo automático o semi-automático a una o más soluciones consideradas como óptimas.

Los métodos de simulación, en cambio, están basados en soluciones propuestas por el planificador, en función de su experiencia y su conocimiento de la realidad específica; tales soluciones son, a posteriori, evaluadas y confrontadas entre ellas, quedando por tanto simulando el funcionamiento del sistema. Los resultados de la simulación proporcionan al planificador informaciones susceptibles de ser utilizadas para mejorar el resultado conseguido.

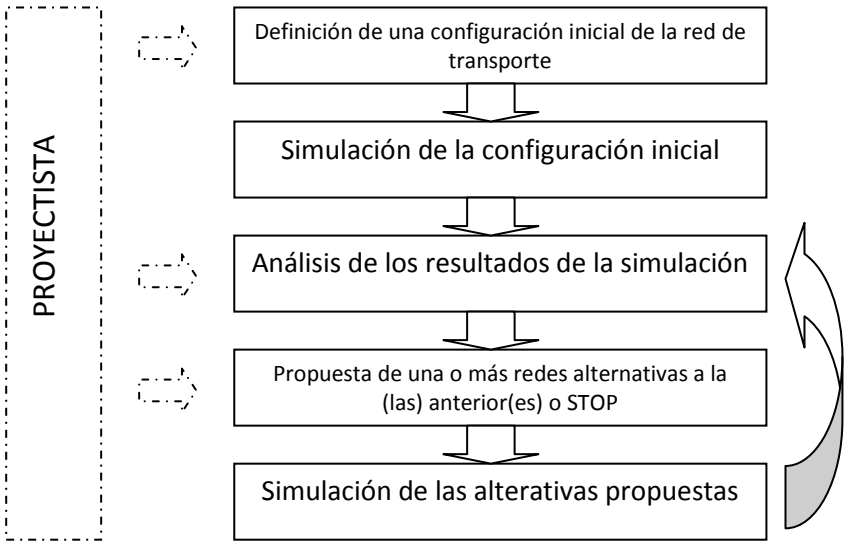


Figura 7: Esquema simplificado de los métodos basados en la simulación (Russo et al., 2002).

Algunos métodos utilizan un criterio de valoración basado en un solo indicador, por ejemplo, el valor de la función objetivo en correspondencia a una solución específica; otros,

en cambio, adoptan enfoques de tipo multicriterio.

Los primeros métodos de simulación solamente se basaban en resultados "numéricos"; Sucesivamente se han desarrollado determinados software que permiten una simulación gráfica, ósea una representación de la red, de los flujos y de otras características de del sistema.

En la figura 7 se representa un esquema simplificado de los métodos de planificación basados en la simulación del sistema de transporte.

A continuación se exponen los principales trabajos relativos a métodos basados en la simulación.

Voorhes and Associates (1969) y Constinett (1970) desarrollan los primeros métodos basados en simulación; los modelos propuestos simulan y valoran algunas características para un conjunto determinado de líneas y frecuencias.

Pratt, Schultz (1972) propone un método de planificación, basado en la simulación del sistema, el cual tiene en cuenta los tiempos de trasbordo entre líneas.

O'Brien (1974) propone un procedimiento en cinco pasos: (1) generación de los recorridos de las líneas, (2) previsión de las cargas, (3) definición de las frecuencias, (4) simulación y análisis del sistema en diferentes períodos de tiempo, (5) análisis de recorridos alternativos. Los pasos (1), (3) y (5) quedan a cargo del proyectista.

Daly (1973) y Last, Leak (1976) proponen y utilizan el modelo TRANSEPT para la simulación del sistema. Tal modelo permite efectuar asignaciones a las redes de transporte colectivo mediante el algoritmo de Dial.

WMTPE (1981) Propone un método de simulación que también permite la definición de alternativas de redes y su valoración en función de los costes y beneficios de la explotación.

Schneider, Porter (1974), Schneider et al. (1974), y Schneider y Clark (1976) desarrollan los primeros trabajos que proponen la simulación gráfica interactiva del sistema. El sistema de simulación propuesto UTRANS permite visualizar en vídeo y de modo interactivo el sistema y los efectos de los cambios sobre el mismo. Este método es apto para redes de autobús del tipo “many to one”.

Hsu, Surti, (1977) propone un procedimiento en tres fases: generación de

alternativas, simulación del sistema y valoración de dichas alternativas. Es un enfoque mixto en cuanto que pueden ser optimizados determinados problemas individuales en los que se descompone el problema originario.

Rapp (1972a, b) Rapp,Gehner (1973, 1976) Rapp et al. (1976) Rapp, Mattenberger, (1977) proponen un sistema basado en la simulación gráfica interactiva. En su interior se implementa un algoritmo de asignación del tipo "multiruta". La demanda de transporte se considera, en todo caso, rígida.

Andreasson (1978, 1980) y Hasselstrom, Harris (1980) elaboran un sistema basado en la simulación gráfica interactiva, que permite simular también trasbordos entre líneas.

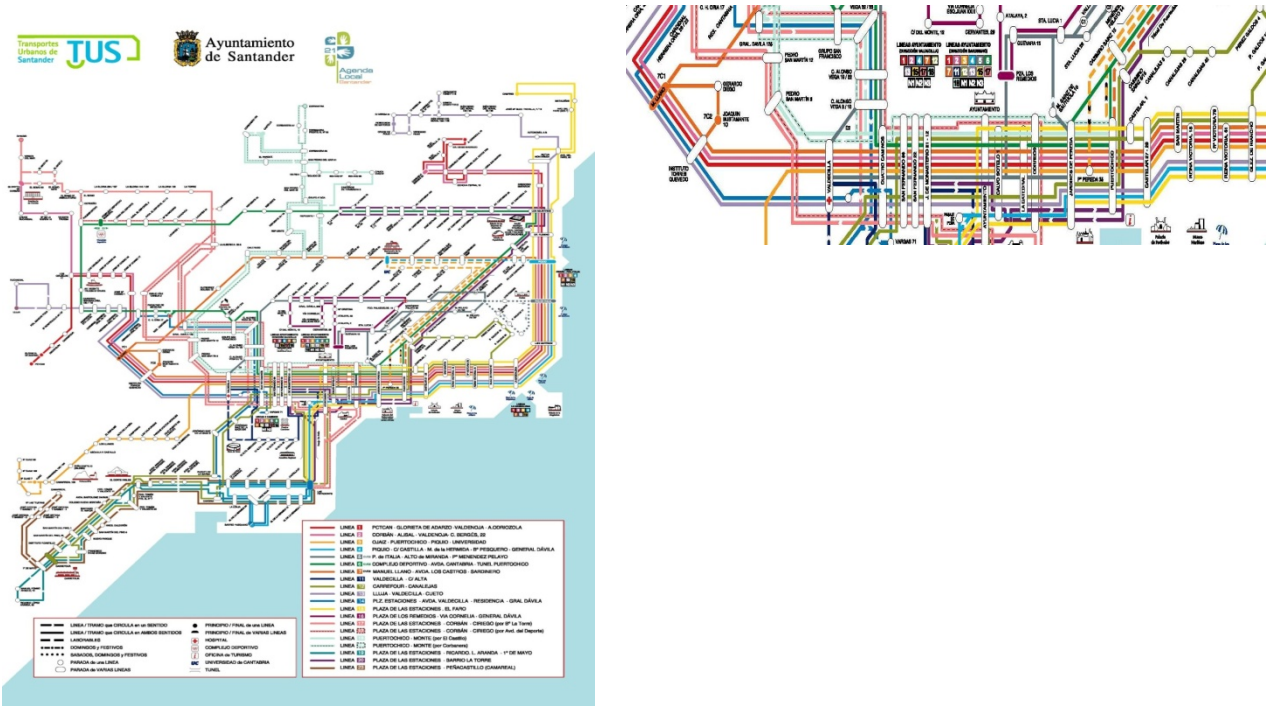
Di Giangi, Montella (1995) proponen una metodología general de planificación a través de simulación, en que la valoración y la elección de las alternativas de planificación se efectúa a través de un análisis multicriterio. Los criterios considerados son la eficiencia, la eficacia y la calidad del servicio.

Actualmente, los métodos de simulación son los más utilizados en la práctica profesional, ya que permiten valorar y tener en cuenta parámetros y factores que no siempre son fácilmente modelizables y, por lo tanto, valorables en procedimientos de optimización "en forma cerrada." A nivel de investigación los métodos de simulación han sido, sobre todo en los últimos años, casi completamente reemplazados por los métodos de optimización. Estos últimos necesitan, en todo caso (en el interior de los algoritmos resolutivos) una fase de simulación para el cálculo del valor de la función objetivo y/o la valoración de las soluciones generadas en cada paso.

3. JUSTIFICACION DEL PROYECTO

La red de transporte urbano de la ciudad de Santander es una red lineal, tal y como se muestra en las figuras 8a y 8b. Todas las líneas de autobús del Ayuntamiento de Santander pasan por las mismas calles y muchas de ellas tienen recorridos muy similares, lo que hace que en determinados recorridos el usuario tenga a su disposición hasta 7 u 8 líneas diferentes para realizar su trayecto, sin la necesidad de hacer ningún transbordo. Al igual que en la zona centro hay un exceso de líneas, en las zonas periféricas hay una falta de conexiones con las otras zonas.

En el apartado 2.2.2. "La determinación del recorrido de autobuses: Filosofía general", expongo como varios autores recomiendan que este tipo de redes, es muy recomendable sustituirlas por las redes troncoalimentadas, tal y como se ha hecho en otros lugares como Bogotá y La Barranquilla en Colombia. Estas redes constan de dos tipos de líneas: las troncales y las alimentadoras. De este modo evitas la superposición de líneas y favoreces los transbordos.



Figuras 8 a y b: Plano de las líneas del TUS y detalle del paso de estas por el centro de Santander.

4. SISTEMAS BRT

El sistema de autobús de tránsito rápido, (Bus Rapid Transit en inglés, BRT), conocido en español también como sistemas de autobús expreso, sistemas de transporte rápidos en autobuses o sistemas de transporte público masivo en autobuses son soluciones de transporte de media y alta capacidad en superficie basadas en autobuses. Este tipo de sistemas de transporte revolucionaron el transporte urbano en las últimas décadas por su versatilidad y bajos costos de inversión en infraestructura, mientras permiten una amplia variedad de soluciones de transporte de capacidades similares a las de tranvías y subterráneos. En el mundo, los países que lideran la implementación de este sistema de transporte son los países latinoamericanos en especial Brasil, Ecuador y Colombia en donde fueron implementados en ese orden , pero ya han sido ampliamente adoptados en Argentina, Perú, China, India, Canadá, Estados Unidos, México y Venezuela.

4.1. Características de los Sistemas BRT

Un sistema BRT tiene como mínimo las siguientes características:

- Carriles exclusivos (o carriles segregados del tráfico mixto) para autobuses.
- Pago de la tarifa y validación del viaje fuera del autobús.
- Puntos de paradas fijos con plataformas.
- Autobuses de gran capacidad (articulados y biarticulados). Sin embargo, existen sistemas que en sus inicios, cuando la demanda no es muy alta, utilizan autobuses sencillos.

Adicionalmente a las anteriores características, los BRT pueden tener:

- Carriles de sobrepaso en las estaciones, que permite la implementación de servicios expresos, y que aumenta sustancialmente la capacidad del sistema.
- Buses de piso bajo con estaciones cerradas a nivel.
- Buses "padrones" que son buses de piso alto, que tienen por el lado izquierdo puertas al nivel de las plataformas y por el lado derecho puertas a nivel de la calle.
- Plataforma elevada a la altura del piso de los buses para hacer más ágil el abordaje y mejorar el acceso.

- Señal de preferencia para buses: dar un trato preferencial a los buses en las intersecciones como por ejemplo extender la duración del semáforo en verde para los buses, o activación del semáforo en verde cuando se detecta un autobús.
- Cruce de prioridad es particularmente útil cuando se implementa junto con carriles o calles dedicadas porque el tráfico de propósito general no interviene entre buses y señales de tráfico.
- Combinación con autobuses alimentadores, que es un servicio que recoge y deja a los pasajeros en una estación de metro o en una parada de autobús de tránsito rápido.

Los sistemas BRT tienen un gran número de ventajas, a la vez que también tienen algunos inconvenientes. Algunas de las cuales pasamos a detallar a continuación:

Ventajas

- Paradas cortas, es decir, subida y bajada de varias decenas de pasajeros en cortos períodos de tiempo. En la mayoría de los sistemas de autobuses tradiciones ese proceso es lento por el hecho de tener ingreso por una sola puerta para poder pagarle al conductor o validar el tiquete, mientras que el sistema BRT permite a los pasajeros aborden o desaborden simultáneamente por todas las puertas del bus.

- Menor número de paradas. Los buses de los sistemas BRT, mientras operan dentro de los carriles exclusivos, solo pueden detenerse en estaciones.

- Independencia de la congestión que se presenta en las calzadas de tráfico mixto, por tener una vía segregada. Ese hecho redunda en dos aspectos: Primero en la confiabilidad en los tiempos por no depender de la congestión, lo que lleva a que la planificación de los horarios pueda ser mucho más precisa (que para un sistema de autobuses tradicionales). Segundo, en menores tiempos de viaje, por el hecho de poder circular sin la interferencia del tráfico.
- Costos de construcción: Depende de las características del sistema BRT, puede llegar a transportar una cantidad de pasajeros de orden similar a la de un metro. Sin embargo, los sistemas de BRT son mucho menos costosos en su construcción.

Inconvenientes

- Los sistemas BRT, pese a tener carriles exclusivos segregados, pueden llegar a tener interferencia con el tráfico en intersecciones. Esto hace que se presenten eventos (como accidentes de tránsito, huelgas) que puedan llevar a que el sistema se detenga completamente.

- Los BRT son mucho menos costosos que los metros por el hecho de no requerir excavación, pero los BRT ocupan espacio en superficie. En los centros de las ciudades, donde existen muchas intersecciones y poco espacio disponible, los BRT tienen un impacto fuerte y sólo podrán operar a bajas velocidades. Hay que tener en cuenta que un BRT, por ser un servicio operado visualmente por conductores en vehículos con motores de combustión, se dificulta su implementación completa en corredores subterráneos.
- Los críticos de los BRT consideran que es un sistema de mediana capacidad y que no es comparable con los sistemas metro.

Posteriormente, pasaremos a detallar como pueden de ser algunas de las características más importantes de estos sistemas y como se puede o debería realizar su operación. Estas características las hemos agrupado en diferentes grupos, dependiendo de a que afecten (infraestructura, operación, tecnología, etc.).

Infraestructura:

→ Carril reservado

La segregación de los vehículos del BRT del resto del tráfico es fundamental para su funcionamiento adecuado. No es suficiente con demarcar el carril con pintura, aunque en ciudades como Londres los carriles para buses son de color rojo y son respetados por el resto del tráfico. Esto es posible únicamente porque los carriles de color han sido complementados por un sistema complejo de cámaras de seguimiento de tráfico. La forma más sencilla de hacer esta fiscalización es la de ubicar separadores físicos en la división entre carriles. Un aspecto fundamental de estos separadores es que, no obstante su carácter divisorio, permiten que los vehículos puedan

salir de su carril en caso de emergencia o en cualquier situación en la que la operación normal del sistema se vea modificada.

Un aspecto adicional a tener en cuenta es el material con el cual se construye el carril exclusivo. Dado que los buses del sistema BRT son en muchos casos vehículos articulados, el peso que ejercen sobre la superficie es mucho mayor que el de otros vehículos. La opción recomendada generalmente es la de hormigón en las estaciones y asfalto en los carriles. En los casos en que se construye un sistema de BRT pero se mantienen los carriles existentes, es absolutamente necesario reforzar el carril que exista.

En algunos casos donde se busca un alto desempeño del BRT se desarrollan carriles de adelantamiento y gran parte del sistema tendrá dos carriles por sentido. Esto se construye para mejorar la combinación de rutas en el sistema y para tener la posibilidad de tener rutas "exprés" en el sistema. Normalmente se construye el BRT con carril de adelantamiento en la estación, aunque todo depende del modelo operacional que se vaya a utilizar.

➔ Estaciones

Se utilizan estaciones en el separador (es decir, entre los dos carriles del BRT) en lugar de ubicarlas en los costados de la vía. Después de la experiencia de muchas ciudades con estos sistemas, se ha concluido que esta opción es mucho más eficiente en términos de operación y de uso de espacio.

Las estaciones son elevadas: esto requiere que los vehículos también sean de plataforma elevada, lo cual es además menos costoso en los buses. Las estaciones elevadas se utilizan para facilitar la utilización exclusiva de estaciones (y no de otros lugares del corredor) para subir y bajar del bus. Además, se facilita inmensamente el acceso al bus por parte de los usuarios discapacitados que tendrían dificultades con otro tipo de estaciones donde existe un bordillo o unas escaleras.

Las estaciones tienen los torniquetes de entrada y salida al sistema: esto permite que los usuarios verifiquen su tarifa fuera del vehículo (lo cual incrementa la velocidad del sistema) y para que puedan hacer transbordos sin pagar tiquetes adicionales.

Las estaciones son “cerradas”: las estaciones tienen “techo y paredes”, lo cual facilita la protección de los usuarios contra el clima y facilita la parada de los vehículos en lugares específicos para recoger pasajeros. No obstante, esto hace que sea más costosa la estación.

➔ Terminales y patios

La función principal de las estaciones terminales es la de recibir la mayor cantidad de pasajeros posible y orientarlos de la forma más fácil a sus destinos. También sirve como centro de intercambio con otros medios de transporte (intermunicipal, regional, etc.). Una opción para el desarrollo de las estaciones terminales es la de realizarlas en conjunto con un constructor privado, donde el constructor proporciona la infraestructura para el terminal y la integra con un desarrollo comercial propio cuyas ganancias podrá explotar.

➔ Centro de control

El centro de control es el lugar desde el cual se hace un monitoreo permanente de la operación completa del sistema. Desde este centro se hace seguimiento de la planificación de servicios que se ha acordado semanalmente y se envían y reciben mensajes en tiempo real con los conductores de cada vehículo. También se toman decisiones y dan instrucciones en caso de accidentes, problemas de operación, o en caso de necesitar un vehículo adicional para cubrir un servicio también se solicita desde este centro de control. Es claro entonces que el componente fundamental de este centro de control es el de sistemas de

comunicación permanente con los vehículos (generalmente a través de GPS), con personal en la vía, y la existencia de software especializado para hacer el seguimiento de los vehículos. Normalmente también se cuenta con una serie de monitores que rastrean permanentemente la actividad de las estaciones y, en algunas ocasiones, lo sucedido dentro de los vehículos.

Operaciones:

➔ **Grado de ocupación, frecuencias y tamaño de los autobuses**

Una característica del BRT es que se ha definido como un sistema de transporte masivo. Al ser masivo, también se ha definido como un sistema donde se maximiza la utilización del espacio dentro del vehículo. Para ser más específicos, la aglomeración dentro de los buses de un BRT será similar a la de un metro: en los casos más conservadores serán 4 personas por metro cuadrado, mientras que en los casos más extremos se planifica un sistema con 6 personas por metro cuadrado. Este indicador de ocupación del vehículo será crucial a la hora de definir todo el modelo operacional y financiero del sistema, pues con base en la cantidad de personas por metro cuadrado que se vayan a transportar, se deben definir las frecuencias de los vehículos, sus dimensiones y la cantidad de vehículos que se requieren en algún momento dado. Este aspecto también va a determinar las ganancias del sistema (pues con mayor ocupación dentro de los vehículos se reducen los costos de operación y así de ganancia), tanto para operadores como para el sector público. No obstante, hay que ser muy precavidos al determinar un nivel de ocupación muy alto pues, aunque sea aparentemente muy efectivo para reducir costos, en el largo plazo puede reducir la demanda del sistema como tal pues los usuarios buscarán otras opciones menos aglomeradas.

En la definición del modelo de operaciones del sistema también se van a concluir el tipo de vehículos que se necesitan, pues el tamaño de éstos está íntimamente relacionado con el de la demanda que se haya encontrado en un corredor, las frecuencias más adecuadas en un corredor específico, la cantidad de bahías de paradas en una estación. Es decir, el tamaño y características de los vehículos que se utilicen en un sistema específico no se deben determinar *a priori* como un sistema con buses articulados o estándar, pues esto repercutirá en la operación adecuada del sistema. Si un sistema se diseña *a priori* con vehículos articulados y la demanda es muy baja, se deberán reducir las frecuencias de los buses y esto implica una reducción en la calidad del servicio y una pérdida de ingresos por mala planificación del sistema.

➔ Circulación

Aunque la definición de las operaciones en los carriles exclusivos parece ser el único aspecto para la prestación adecuada de un servicio de BRT, es necesario tener en cuenta la interacción con otros modos de transporte en los cruces y, más importante que esto, la definición de las fases de semáforos a lo largo de los corredores del sistema. Esto es un aspecto que algunas veces no se tiene en cuenta en la planificación, pero que tienen un impacto considerable sobre la operación del sistema. En muchas ocasiones el problema central con este aspecto es que hay una agencia separada a cargo de la operación de los semáforos, y en muchas ocasiones la programación de los semáforos no se coordina con base en la programación del sistema BRT sino en el tráfico en general. En situaciones extremas, los policías de tránsito han llegado a detener el flujo de buses en un sistema BRT para descongestionar las vías de automóviles particulares, al parecer porque éstos últimos parecen ser de mayor importancia. De ahí que la coordinación interinstitucional, en particular en el tema de semáforos, es particularmente crítica.

La coordinación y seguimiento de todos estos aspectos de operación se realiza desde el centro de control, el cual (como se vio anteriormente) tiene a su cargo el monitoreo de la planificación del sistema y la comunicación con los vehículos y otros actores en el sistema, además de solucionar problemas que se presenten en el sistema.

➔ Servicio al cliente

Un último aspecto que hace parte de las operaciones de un sistema BRT es el de servicio al cliente. Muchas veces los sistemas de transporte público se planifican con una dedicación minuciosa a los aspectos técnicos de la frecuencia de los vehículos, la definición de cronogramas y el monitoreo de esa operación. Pero los usuarios son quienes realmente mantendrán el sistema en operación, pues sin ellos no existen clientes ni demanda. La prestación del servicio siempre debe ser planificada orientada con base en las necesidades de los usuarios. Por esto, la definición de criterios claros de limpieza de vehículos e infraestructura, el diseño de señalización clara y comprensible para usuarios, la constante búsqueda de retroalimentación de los usuarios al sistema, la provisión de infraestructura de apoyo (baños, lugares de descanso en estaciones, factores estéticos del sistema, etc.) son cruciales para el buen desempeño del sistema. Esto también se relaciona directamente con la aglomeración excesiva en los vehículos y la frecuencia adecuada de servicios. Los usuarios deben hacer parte del sistema y deben incluirse incluso desde la concepción del sistema y su implementación inicial. El olvido de este aspecto puede resultar en el fracaso completo de un sistema.

Estructura del negocio:

El operador debe tener claro qué responsabilidades tiene (mantenimiento de los vehículos con parámetros específicos, seguimiento de cronograma, etc.). La asignación de la operación a compañías por medio de concurso (licitación) y la especificación de la duración finita del contrato garantizan que este servicio sea de buena calidad. Los operadores incluyen no solamente los que están a cargo de los vehículos (generalmente varios en un solo sistema, pero bajo las mismas reglas de operación), sino también a un operador adicional que está a cargo de la recolección de la tarifa y el mantenimiento de este componente del sistema. Estos son una organización aparte de los operadores de vehículos, y hacen un seguimiento de la cantidad de pasajeros transportados y el dinero recolectado. Además, este dinero es entregado a una organización financiera que controla y monitorea diariamente la recolección de tarifa.

El pago a los operadores según los kilómetros de operación en lugar de los pasajeros transportados.

Tecnología:

Vehículos

La elección entre vehículos se hace en función de dos características: el tipo de combustible y el tipo de vehículo (plataforma alta o baja). Los vehículos de plataforma baja han tenido bastante publicidad por ser los más flexibles y de "mejor" imagen, pero sus costos capitales y de mantenimiento, y las diferencias significativas de eficiencia en prestación del servicio han hecho que los vehículos de plataforma alta sean preferidos en los sistemas BRT. Éstos últimos, además de tener un mejor desempeño y menores costos de operación, tienen mayor facilidad para la fiscalización de la compra de tiquetes, la utilización de la estación designada, y tienen mayor capacidad de asientos (pues las llantas no intervienen como en los vehículos de plataforma baja).

➔ **Recolección de la tarifa**

Los métodos de recolección de la tarifa deben ser lo suficientemente versátiles para prestar un servicio adecuado y eficiente: tener capacidad de varios tiquetes, ser de bajo costo, de fácil utilización y recarga, posibilidad de tarifa basada en distancia u otra. Las opciones que existen de recolección de tarifa para un BRT son los tiquetes de papel, las monedas o fichas, las tarjetas de banda magnética o las tarjetas inteligentes (*smart cards*). Las dos primeras no se utilizan normalmente por falta de versatilidad y de funciones avanzadas y de seguimiento, mientras que las tarjetas de banda magnética y la tarjeta inteligente se han visto como una opción adecuada para un sistema BRT.

El potencial completo de un sistema BRT se logra cuando se implementa con verificación fuera del vehículo, es decir cuando el usuario valida su tarjeta cuando entra a la estación, mas no al vehículo. Esto incrementa significativamente el desempeño del sistema (pues pueden entrar y salir más personas del bus cuando se detiene) y evita los problemas de evasión de tarifas. Además, hace más fácil un seguimiento completo de los orígenes y destinos de los usuarios del sistema según las estaciones (y no los vehículos) donde entran y salen del sistema.

➔ Sistemas de seguimiento

Como se ha descrito anteriormente, los sistemas de seguimiento de los vehículos son un componente crucial para el desempeño de un sistema BRT. Por medio de la ubicación exacta de un vehículo en tiempo real (por medio de un sistema de posicionamiento geográfico – GPS) y la comunicación con el conductor, se puede monitorear y ajustar la prestación del servicio según los parámetros establecidos previamente. Cada vehículo debe entonces tener un dispositivo de comunicación con el centro de control y un elemento de comunicación satelital para su ubicación en el sistema GPS utilizado en el centro de control para monitorear su ubicación y seguimiento del cronograma establecido. Esto se complementa con un software diseñado específicamente para este propósito.

➔ Información al usuario

El desarrollo del internet ha mejorado sustancialmente la posibilidad de tener acceso a la planificación de un servicio específico de transporte público, pues mediante una página web que contenga una base de datos con la información sobre la programación del sistema, se puede programar un viaje con antelación y sin necesidad de recurrir a cronogramas detallados ni a mapas específicos. El único problema con una aplicación exclusiva de información vía internet es que muchos usuarios del sistema (especialmente en América Latina) no tienen fácil acceso a Internet y no les será útil este servicio.

También existe la posibilidad de recibir información sobre el servicio de transporte vía mensajes de texto (*SMS*) al teléfono del usuario. Esto se complementa en las estaciones con una pantalla con información en tiempo real sobre los servicios que llegarán pronto a la estación y el tiempo que hace falta para que lleguen a esa estación específica. Esto mejora sustancialmente el servicio, pues reduce la percepción del tiempo de espera de los usuarios.

Algo directamente relacionado con una buena información al usuario es la simplicidad del sistema. En la sección de operaciones se describía la necesidad de realizar una programación de servicios que sea lo suficientemente sencilla para que los usuarios no tengan problemas con comprender el sistema y cómo utilizarlo. Los sistemas de información al usuario son la herramienta más útil para resolver este problema, pues pueden simplificar enormemente los sistemas complejos de información al usuario. Es decir, cuando existe un sistema de información informático en una estación, el usuario únicamente tendría que indicar la estación a la que se dirige y el sistema le entregará la información específica sobre las líneas que debe tomar para llegar a su destino. Sin este sistema, el usuario deberá recurrir a los mapas.

Integración con otros medios de transporte:

➔ **Peatones**

Los peatones son el primer usuario del transporte público. Como tales, debe "extenderse la alfombra roja" ante ellos. La infraestructura de un BRT debe incluir no solamente estaciones y carriles exclusivos, sino también aceras con espacio adecuado para que los peatones caminen cómodamente y puedan llegar a la estación de manera segura. También se deben tener cruces adecuados y semaforizados en todos los casos que sea

posible. Cuando esto no sea posible, se deben construir puentes peatonales con acceso en rampas para las personas discapacitadas. Si esto se deja en un segundo o tercer plano, es muy probable que el sistema BRT no tenga la demanda esperada. Así, se deben evitar al máximo las caminatas largas entre transferencias, los cambios de nivel (es decir, una cantidad excesiva de escaleras para llegar a las estaciones o en transferencias) y la mayor seguridad posible en los trayectos desde y hacia las estaciones (no solamente refiriéndose a estaciones sino también a iluminación en estaciones y aceras). Esto amplía la visión del transporte público como algo puramente funcional hacia una prestación de un servicio crucial para los ciudadanos.

➔ **Bicicletas**

Las bicicletas sufren de muchos de los problemas que se describieron para los usuarios, pero en ocasiones tienen más problemas al circular en la vía pues no existe claridad sobre su rol en un lugar u otro. Adicionalmente, estacionar una bicicleta es a veces imposible, y paradójicamente también está prohibido estacionar bicicletas en las paradas de transporte público. Ante esto, es necesario aclarar el rol de la bicicleta como factor de integración al transporte público:

-La bicicleta tiene un área de influencia mucho mayor que un peatón, siendo posible un viaje de 3 kilómetros con el mismo o menor esfuerzo que un viaje a pie de 500 metros;

- La bicicleta ocupa muy poco espacio (hasta 20 bicicletas pueden estacionarse en el espacio de un automóvil), por lo que los costos de estacionamiento son mínimos;

- La bicicleta puede remplazar en parte la función de un sistema de alimentación;

- La bicicleta es un vehículo que no emite gases contaminantes en la atmósfera al ser utilizada, lo cual la hace una opción de transporte completamente sostenible.

Con base en esto, se puede afirmar que una política de integración de bicicletas a un sistema de BRT traerá beneficios palpables, pues se incrementa el nivel de demanda del sistema (dado que el área de captación del sistema es mayor que la de personas

caminando), cuesta muy poco mantener estacionamientos para bicicletas, y en general incrementa la rentabilidad del sistema pues con muy bajos costos se generan muchos beneficios en términos de incremento de pasajeros que utilizan el sistema.

Las tres formas básicas para poder integrar la bicicleta a un sistema de BRT son:

1. Facilitando la entrada de la bicicleta a un vehículo: para esto es posible destinar un espacio específico de un vehículo para bicicletas, o también generar un servicio específico (p.ej. cada 30 minutos) cuya función sea específicamente la de transportar bicicletas (podría ser en un vehículo sin sillas). Esta opción tiene la ventaja de que no tiene un costo asociado muy alto (en algunos casos ningún costo), aunque puede representar alguna incomodidad para los otros pasajeros durante las horas de mayor demanda;
2. Utilizando soportes para bicicletas adelante o atrás del vehículo: esta opción implica la utilización de soportes que están fuera del vehículo donde se pueden asegurar la bicicleta. Aunque es muy útil, la desventaja principal de este sistema es que puede tomar mucho tiempo montar y desmontar las bicicletas en un sistema, especialmente en un sistema de estación y vehículo de plataforma alta. Con el nivel de servicio de un BRT, esto podría volver menos rápido el sistema de BRT;
3. Construyendo estacionamientos para bicicletas en las estaciones donde haya potencial demanda de uso de bicicleta: idealmente, todas las estaciones de BRT deberían tener alguna infraestructura segura para estacionar una bicicleta. No obstante, en algunas ocasiones esto solo es posible en las estaciones terminales y algunas estaciones intermedias con alta demanda. Lo importante para que un estacionamiento de bicicletas tenga éxito en un sistema BRT es que debe ser gratuito (es decir, sus costos asociados deben ser integrados a la tarifa), debe ser cubierto y debe tener un nivel alto de seguridad, pues los usuarios dejarán su bicicleta en la estación durante todo el día y volverán en la tarde o noche a recoger su bicicleta.

Además de utilizar una o más de estas opciones en un sistema de BRT, debe hacerse lo posible por integrar también la construcción de infraestructura para bicicletas (carril bici) para que los usuarios no solamente tengan un lugar seguro en la estación sino llegando a ella. No obstante, es claro que este componente, aunque podría ser parte de la construcción de infraestructura del sistema, también se escapa un poco del alcance del proyecto.

➔ **Transporte público**

En la gran mayoría de ciudades del mundo no existe un solo sistema de transporte público. De hecho en muchas ciudades hay tal vez un exceso de sistemas de transporte público al mismo tiempo. El BRT soluciona en parte la sobreoferta de sistemas de transporte público, pero no es lógico esperar que remplace completamente todos los demás sistemas de transporte público, o por lo menos no es posible en un corto o mediano plazo. Así, el sistema BRT debe generarse como un sistema no paralelo sino complementario de los demás sistemas de transporte público, y la realización de un sistema BRT debe ser también complementada por la ejecución de un mejoramiento de los demás componentes del sistema de transporte público en general.

Esto quiere decir que la integración con estos sistemas (ya sea un sistema férreo o un sistema basado en buses) es una actividad prioritaria que hará parte de la planificación del sistema. Los dos aspectos más importantes de la integración son la integración tarifaria y la integración física.

- **Integración tarifaria**: Esta integración se refiere al hecho de que todos los sistemas de transporte público tengan un mismo medio de pago y, dentro de lo posible, exista la posibilidad de utilizar todos los componentes del transporte público con una misma tarifa. Una de las cuestiones más complejas de la integración tarifaria es la distribución de la tarifa entre sistemas, pues los costos de operación, el cubrimiento y los demás aspectos de cada sistema específico varían enormemente y los criterios de distribución de tarifa no son tan claros como lo serían dentro de cada sistema en sí. No obstante, un sistema de transporte público con integración tarifaria es crucial para la prestación de un servicio real de transporte público en una ciudad.

- **Integración física**: La integración física se refiere a la facilidad con que los

usuarios de un sistema puedan hacer una transferencia a otro sistema. Aunque pareciera sencillo, esta cuestión implica la definición de localización específica de estaciones para cada sistema, y en algunas ocasiones la construcción de estaciones conjuntas para sistemas distintos. No obstante, una integración física adecuada genera beneficios mutuos para los sistemas involucrados, debido a la combinación de viajes que existen entre sus usuarios. Un aspecto que debe ser estudiado antes de implementar un sistema de transporte público son las diferencias verticales entre estaciones: es decir, si un sistema de BRT se ha construido y se pretende construir un metro elevado "integrado" al anterior, será muy difícil lograr que los usuarios del BRT hagan una transferencia al metro elevado, dado que será necesario salir de una estación, subir escaleras y entrar al otro sistema. Una situación aún peor es cuando un sistema subterráneo está "integrado" a un sistema elevado. No obstante, este tipo de problemas de cambios de nivel no existen entre sistemas BRT y otros sistemas basados sobre buses.

➔ **Taxis**

Los operadores de taxis, aunque en apariencia son una competencia a los sistemas de transporte público masivo, son realmente un aliado importante de la prestación de servicio de un BRT. Esto se debe a que existen algunas situaciones en las que la estación de llegada de un usuario está a una distancia significativa de su destino final. Cuando no existe la posibilidad de utilizar una bicicleta para completar el viaje, los taxis son una opción válida como complemento al viaje. Aunque aquí no se puede aplicar una integración tarifaria (o por lo menos no existen experiencias de integración tarifaria entre taxis y sistemas de transporte masivo hasta el momento), los usuarios que tienen un sistema bien organizado de taxis en su estación de llegada tienen un mejor nivel de servicio que los que carecen de esta opción. Además, la existencia de una integración adecuada BRT- taxi puede desincentivar el uso del automóvil para viajes que esta integración podría suplir.

Una segunda opción de integración es la que se utiliza en algunos sistemas europeos con gran éxito, y que se ha implementado en algunas ciudades de América Latina informalmente: los bicitaxis. Las ventajas de este tipo de transporte es que, como la bicicleta, no genera emisiones al ser utilizado, y ocupa un espacio mínimo. Es también una buena opción de empleo, además de suplir las necesidades de algunos usuarios que, como los que utilizan taxis corrientes, tienen su estación de llegada a una distancia relativamente larga de su destino final. Podría también decirse que los bicitaxis tienen un área de captación inferior a la de un taxi convencional, por lo que suplen un público distinto.

En general, deben proporcionarse facilidades de infraestructura y legales para permitir la integración de viajes entre un sistema BRT y taxis o bicitaxis. El problema fundamental de los últimos es que se han percibido por varios grupos de la población como un vehículo peligroso, lo cual es una afirmación imprecisa.

➔ Automóviles ("park and ride")

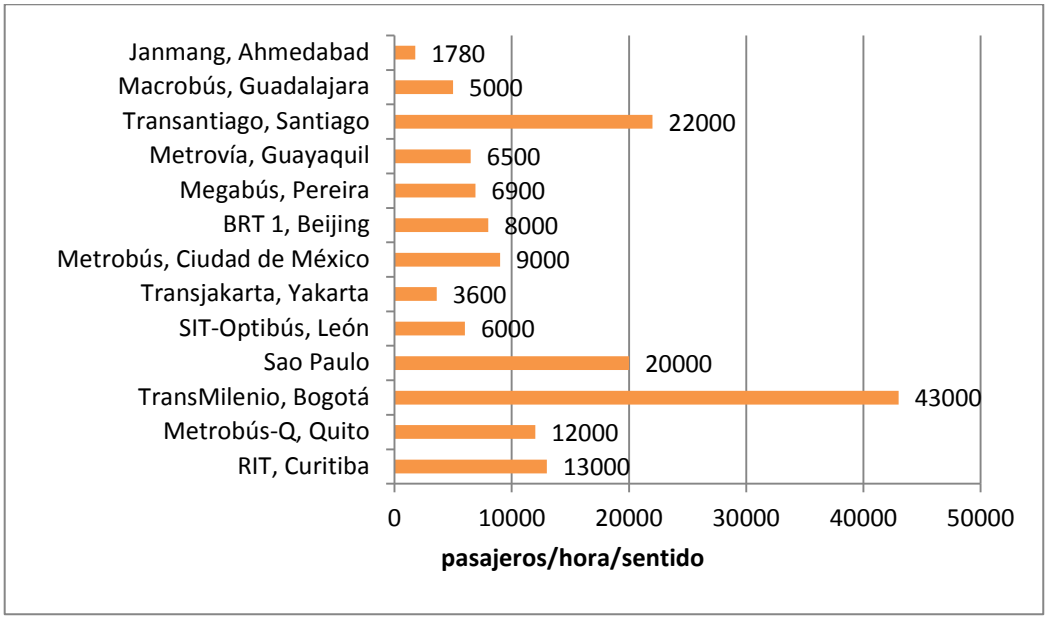
La última forma de integración de un sistema BRT con otros sistemas es con el automóvil. Aunque se ha visto que este medio de transporte no es sostenible ni recomendable en una ciudad, es también verdad que las ciudades van a seguir teniendo automóviles por los próximos años y que de nada sirve olvidar su existencia ni esperar su

pronta desaparición. En lugar de esto, una solución es generar la integración de un viaje en automóvil (normalmente desde el hogar del usuario) hasta su estación de inicio de viaje. Esto se llama comúnmente “park and ride” (estacione y “monte”), y consiste en el suministro de estacionamientos para automóviles en las estaciones terminales de un sistema BRT. El único problema con este instrumento es que se necesita de mucho espacio para los estacionamientos de automóviles y que regularmente sería recomendable cobrar por el servicio de estacionamiento. No obstante, la utilización de este tipo de integración sería muy viable cuando la estación terminal es también un centro comercial o similar, donde el usuario puede pagar la tarifa del transporte público antes de entrar al estacionamiento, y así tener algún tipo de descuento sobre el valor total de su estacionamiento al final del día. Esto tiene la finalidad de reducir la cantidad de viajes de automóviles hacia el centro de la ciudad, y así reducir las externalidades asociadas al uso de este vehículo.

4.2. Sistemas BRT en el mundo

En todo el mundo hay unas 150 ciudades que tienen un sistema BRT implantado. El conjunto de todos estos sistemas mueve más de 22 millones de pasajeros al día, en solo Europa se mueven cerca de 1 millón de personas, lo que representa un 4,2 % de los pasajeros, dato que es muy bajo si tenemos en cuenta que un 30% de esas 150 ciudades se encuentran en Europa. La mayor parte de los pasajeros que mueven los sistemas BRT en el mundo se encuentran en Latino América, un 61%, que es donde están más desarrollados estos sistemas, ya que fue donde comenzaron a existir, y donde mejor funcionan.

A continuación, hay dos graficas muy representativas de los sistemas BRT más importantes del mundo, la primera representa el volumen de pasajeros por hora y por sentido de cada sistema y el segundo la velocidad comercial de los mismos, variables que son fundamentales a la hora de diseñar un sistema BRT.



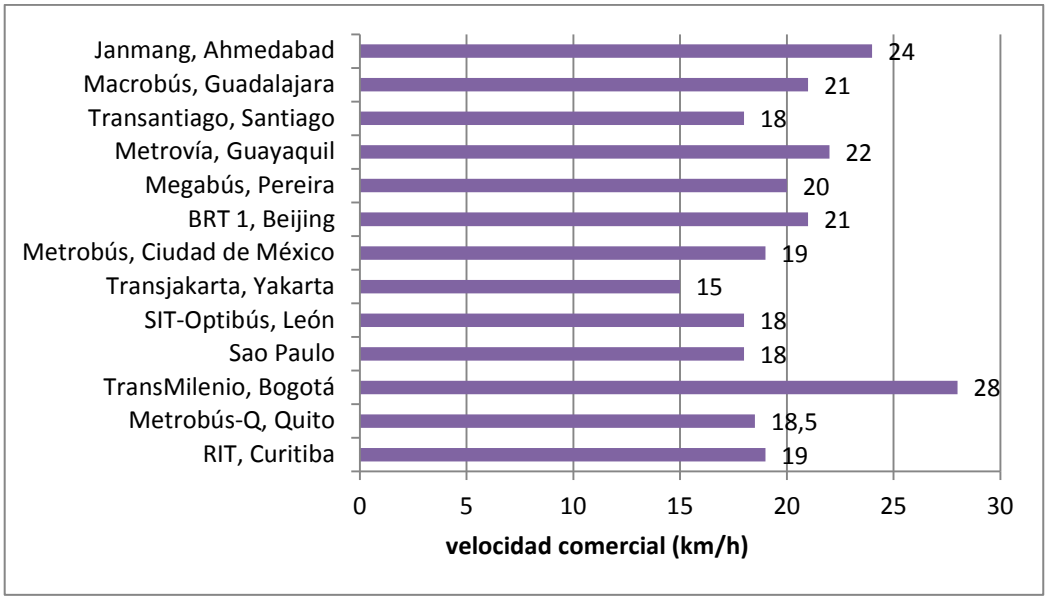


Figura 9a y 9b: Gráficas comparativas entre diferentes sistemas BRT operativos en el mundo.

Después de lo visto anteriormente, paso a detallar el funcionamiento de algunas ciudades que implantaron algún sistema BRT. Las ciudades elegidas como muestra están ahí, porque son una muestra muy representativa, en esta muestra están: la primera ciudad que implantó un sistema BRT en el mundo, las ciudades con los sistemas BRT que mejor funcionan en el mundo y los que peor lo hacen, el primero de los que fueron implantados en pequeños núcleos urbanos y no en grandes ciudades como en la gran mayoría de los casos y el único sistema BRT que funciona en España (existen más, pero no están todavía en funcionamiento).

Primero se tratan las ciudades de Latino América, ya que como se ha dicho anteriormente, estas ciudades tienen de los sistemas BRT más avanzados y mejores. Después, hay una pequeña muestra de algunas ciudades europeas con estos sistemas, entre los que se incluye la ciudad de Castellón de la Plana (España). Y por último, están algunas de las ciudades de Asia y Oceanía.

4.2.1. Sistemas BRT en América Latina

RIT (Rede Integrada de Transporte) de Curitiba (Brasil)

Curitiba es una ciudad brasileña con una población de 1.800.000 habitantes, siendo así la mayor ciudad del sur del país. Su área metropolitana cuenta con casi 4 millones de habitantes. Curitiba es una de las ciudades más importantes del país. En los últimos años ha experimentado un gran crecimiento, debido a que grandes empresas automovilísticas se han instalado en la ciudad.

La RIT fue el primer sistema autobús de tránsito rápido (BRT) implantado en el mundo, que fue implantada en la década de 1980. La red consta de varias partes, la más importante es la llamada "Líneas rápidas" que recorren los 5 principales ejes de la ciudad, estas líneas tienen todas las características de las líneas BRT (autobuses de alta capacidad, en este caso son biarticulados, carril exclusivo, pago de la tarifa antes de entrar en el autobús, etc.). La existencia de grandes terminales permite cambiarte de autobús en ella sin tener que pagar una nueva tarifa.

Las estaciones de estas líneas son muy representativas de la ciudad, esto es debido a su forma característica de tubo y tienen la plataforma elevada al igual que los autobuses, para permitir un fácil subida y bajada del autobús, para facilitarlo aún más, al abrirse las puertas de los autobuses salen unas pequeñas plataformas que coinciden con las de la estación, tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen.

Además de estas líneas existen otros siete tipos de líneas más, que sirven para

alimentar a las líneas rápidas, para conectar barrios de las afueras entre sí, líneas circulares que recorren el centro, autobuses turísticos, los interhospitalarios, etc.

Este sistema es utilizado por el 85% de los habitantes de la ciudad y sirvió de inspiración para muchas otras ciudades como es el caso de Bogotá, Los Ángeles y México DF. El RIT cuenta con una flota de más de 2.000 autobuses, que llevan a unos 13.000 pasajeros por hora y por sentido. La velocidad comercial de este sistema ronda los 19 km/h. El coste total del sistema fue de unos 2,4 millones de $ por kilómetro, que es un coste relativamente pequeño en comparación con otros sistemas BRT.

TransMilenio de Bogotá (Colombia)

Bogotá es la capital de Colombia. Tiene unos 7 millones y medio de habitantes. Es la mayor ciudad y la más poblada del país, además, es el centro cultural, industrial, económico, artístico y turístico más importante de Colombia.

Es el sistema de BRT más grande del mundo, superando incluso a un gran número de líneas de metro. TransMilenio es un sistema de autobús de tránsito rápido con corredor segregado del tipo sistema cerrado, troncoalimentado, de plataforma alta y con paradas encapsuladas (solo se puede acceder a ellas por las puertas dedicadas especialmente a ello y para subir y bajar del autobús se hace gracias a unas puertas deslizantes que se abren a la vez que las del autobús), en las que la tarifa se cobra antes de entrar al bus. Por lo general, hay doble vía de exclusividad en los dos lados de la estación, para permitir que los articulados de servicio expreso sobrepasen a los de servicio corriente.

Este sistema está basado en el RIT de Curitiba, pero con unas pequeñas modificaciones, todos los autobuses, da igual de la línea que sean, tienen el mismo color y existe la posibilidad de circular todo el día en los autobuses de la red pagando una única tarifa. Hay una empresa que es la que se encarga de planificar todo, el servicio lo prestan un gran número de empresas, de la recaudación se encarga otra y de explotar la publicidad dos más, una la de los autobuses y otra la de las paradas y estaciones.

Existen dos tipos de líneas, las troncales y las alimentadoras. Las troncales cuentan con carriles exclusivos, que solo pueden ser utilizados por los autobuses, vehículos de la empresa recaudadora y por vehículos de emergencias. El sistema BRT cuenta con más de 1.400 autobuses articulados que prestan los servicios en las líneas troncales y unos 600 autobuses normales de 90 plazas que recorren las líneas alimentadoras, que pertenecen a unas 20 empresas que son las que prestan el servicio.

TransMilenio lleva unos 43.000 pasajeros por hora y por sentido, más del doble de los siguientes sistemas BRT que son el de Santiago (22.000) y el de Sao Paulo (20.000) y más que el 95% de los sistemas de metro del mundo. Por poner algunas referencias, sistemas de metro como el de Londres, lleva unos 75.000 pasajeros por hora y por sentido, el de Pekín 60.000, el de Barcelona y Berlín 30.000 y el de Bilbao 7.500. Esto es, en parte, gracias a la alta velocidad comercial que tiene que ronda los 30 km/h, que lo hace muy competitivo y las tarifas, que lo hace muy atractivo al usuario. Este sistema requirió una grandísima inversión (12,5 millones de $ por km) en comparación con otros sistemas de BRT, pero no tan alta si lo comparas con sistemas de metro.

Transantiago de Santiago (Chile)

Santiago es la capital de chile. Tiene una población de más de 7 millones de habitantes y es la séptima ciudad más poblada de América Latina y una de las 50 más pobladas del mundo, además de ser de las ciudades más importantes de América Latina y del mundo.

Transantiago reformó por completo la malla de recorridos antigua, diseñando un sistema basado en el uso de servicios alimentadores y troncales, en conjunto con el Metro de Santiago. Para ello, se inspiró en el sistema del Transmilenio de Bogotá, se realizó una

enorme inversión en infraestructura (carriles bus y estaciones) y en la flota de vehículos, y además se estableció el uso de una tarjeta inteligente con el fin de establecer un sistema tarifario integrado.

La puesta en marcha de Transantiago generó una serie de problemas, revelando importantes deficiencias y errores tanto del diseño, como de la implementación del proyecto. El origen de los problemas se cree que fueron dos: el primero fue el intento de implantar una nueva red de transporte totalmente nueva de golpe y no hacerlo por fases, ya que de esta forma es más fácil detectar los errores y corregirlos rápidamente sin que haya grandes repercusiones, y el segundo, los retrasos que sufrieron la mayor parte de las obras en infraestructuras y la falta de autobuses, para la fecha señalada.

El nuevo sistema del Transantiago se implementó en dos etapas, en la primera solo se incorporaron algunos vehículos nuevos (sustituyéndolos por autobuses más viejos) a los servicios antiguos. En la segunda etapa es cuando se cambió la red de transportes de todo el área metropolitana de Santiago de golpe. Este nuevo sistema pretendía reducir el paso de un gran número de autobuses por el centro de la ciudad, para ello se dividió el área metropolitana en diez zonas y todas menos una (la zona centro) tenían su propio sistema de autobuses (autobuses alimentadores), no pudiéndose salir de ella, más tarde esta norma se flexibilizó y algunos autobuses alimentadores salían de sus zonas. Para conectar estas zonas entre sí y con el centro, están los servicios troncales.

El día de la puesta en marcha, afloraron las deficiencias del nuevo sistema, los sistemas de control no funcionaron, por lo tanto, no se pudo controlar que todos los

autobuses que debería haber en la calle de verdad estuvieran prestando el servicio, cosa que no ocurrió, de los 5.000 autobuses que debería haber solo había 1.400 (un 72% menos), lo que hizo que la gente tuviera que esperar grandes periodos de tiempo para poder subirse a los autobuses, que estos estuviesen llenos y que el sistema de metro se desbordase. Los sistemas de pago tampoco funcionaron y el Transantiago fue gratuito durante una semana, las pérdidas diarias rondaban el millón de dólares.

Para intentar arreglar este desastre, se amplió la flota, se sancionó a los operadores de las líneas de autobús por no prestar sus servicios y para corregir el desbordamiento del sistema de metro se crearon los "buses clones", que realizaban el mismo recorrido que las líneas de metro y paraban en las mismas paradas.

Transmetro de Barranquilla (Colombia)

Barranquilla tiene una población de 1.200.000, siendo así la cuarta ciudad más poblada de Colombia. Tiene uno de los puertos marítimos y fluviales más importantes y activos del país.

Barranquilla fue la quinta ciudad colombiana en implementar un sistema de transporte masivo o de alto nivel de servicio. Transmetro cuenta con dos tipos de líneas: las troncales que son servidas por autobuses articulados de 160 plazas y las alimentadoras con autobuses tipo padrón de 80 y minibuses de 45 plazas.

Las líneas troncales, a su vez, son de dos tipos: servicio corriente, que realiza todas las paradas y circula a todas las horas, y servicio expreso que solo circula en horas punta y que solo realiza algunas paradas. Este último servicio se utiliza para dar mayor capacidad en las horas en las que la demanda es muy alta. Todas estas líneas cuentan con carriles reservados (SOLO BUS) separados del resto del tráfico por un pequeño bordillo, que ha dado problemas debido a la mala calidad del hormigón y a que no estaba pintado, por lo cual muchos vehículos no lo veían y lo remontaban.

Las líneas alimentadoras, también son de dos tipos: el servicio tronco-alimentador, realizado por autobuses padrón, los cuales se meten en los carriles reservados para dejar a los pasajeros en las estaciones y solo se presta este servicio en las horas punta, y el servicio de rutas alimentadoras, que cuenta con autobuses padrón o minibuses que circulan por las zonas de menor demanda y a todas las horas a las que funciona el servicio del Transmetro, estos autobuses no pueden entrar en los carriles reservados.

Este sistema cuenta con unos 300 autobuses, 90 de ellos articulados que realizan los servicios troncales y que circulan a lo largo de los 13,3 km de carril reservado. Existen 18 estaciones, 2 de ellas son las principales de las que salen las líneas y otra es intercambiadora o de retorno. Las estaciones normales pueden ser sencillas o dobles, según la capacidad que tengan (1 o 2 buses). Las estaciones "cabecera" o principales son aquellas de las que salen todas las líneas, ya sean troncales o alimentadoras, que también cuentan con taller, zonas de lavado, puntos de repostaje y aparcamiento para los autobuses cuando finalizan el servicio, la superficie aproximada de estas estaciones es de unos 30.000 m^2.

La forma de pago es mediante una tarjeta inteligente, que puede ser personalizada para que en caso de robo o pérdida pueda ser recuperado el saldo de la tarjeta. Se puede coger todos los autobuses que se quieran por el precio de uno siempre y cuando no se salga de las estaciones. También se puede coger tres autobuses en el plazo de hora y media, por el precio de uno. El coste de cada viaje es distinto de lunes a sábado que los domingos y festivos. Si por un casual el usuario no tiene dinero en la tarjeta y no dispone de ningún punto de recarga cercano, el servicio le puede prestar un viaje, descontándoselo la próxima vez que recargue.

Metrobus-Q de Quito (Ecuador)

Quito es la capital de Ecuador y la segunda ciudad más poblada del país con más de 2 millones de habitantes.

El Metrobus-Q es parte del Sistema Integrado Metropolitano de Transporte público, conformado por este, el Metro de Quito y el sistema de autobuses. El Metrobus-Q es como se conoce al Sistema de Transporte Público de Quito que está compuesto por buses articulados (BRT) y buses alimentadores. Está conformado por 5 líneas llamadas "Corredores" que a su vez tienen circuitos que se organizan según la demanda, estos corredores son: Corredor Trole, Corredor Ecovía, Corredor Central Norte, Corredor Sur Oriental, Corredor Sur Occidental. Se está planificando la construcción de varios corredores más, entre ellos un Corredor Nor Oriental y uno hasta el Nuevo Aeropuerto.

El Corredor Trole es el más antiguo de todos los corredores, inaugurado en 1995. Es una línea de trolebús, que recorre el eje longitudinal de la ciudad. Es una única línea, pero que realiza 6 recorridos distintos en función de la demanda. Tiene una longitud de 24 km con carril reservado y realiza un total de 41 paradas. Los trolebuses que realizan el servicio son articulados y cuenta con una flota de 113 de ellos.

El Corredor Ecovía une el norte de la ciudad con el centro histórico y funciona las 24 h del día. El servicio lo prestan autobuses articulados que están equipados con un catalizador, para ser más ecológicos. El problema es que muchos de ellos tienen más de 10 años y, por lo tanto, son una gran fuente de contaminación. Los autobuses están equipados con itinerarios electrónicos que te indican las paradas y, además, te indican por voz la siguiente parada. Los autobuses tienen tres puertas que se abren sincronizadamente con las de las estaciones.

El Corredor Central Norte también une el norte con el centro de la ciudad, pero al contrario que el resto de los corredores este es operado por una empresa privada y no pública. Esto hace que el corredor no funcione óptimamente y tiene muchas críticas, debido

a su falta de mantenimiento. Los autobuses son articulados (74) y convencionales (135), que realizan servicios complementarios, y recorren los 12,8 km de carril exclusivo con los que cuenta este corredor.

El Corredor Sur Oriental fue inaugurado en 2010 y conecta el sur de la ciudad con el centro, uniéndose así al Corredor Ecovía, del cual es una prolongación y recorriendo todo el eje oriental de la ciudad. Los autobuses también son articulados.

El Corredor Sur Occidental fue inaugurado en 2012 y conecta el sur de la ciudad con el centro recorriendo el eje occidental de la ciudad. Funciona como el tramo sur del Corredor Central Norte. Cuenta con 272 autobuses articulados.

4.2.2. Sistemas BRT en Europa

BusWay de Nantes (Francia)

Nantes es una ciudad del oeste de Francia que tiene unos 300.000 habitantes. Su área metropolitana es una de las más importantes del oeste del país. La principal actividad económica de la ciudad está relacionada con el puerto.

La región de Nantes tiene un sistema de transporte público muy completo, ya que cuenta con transporte ferroviario (red de tranvías), fluvial (Navibus) y por carretera (autobús y BusWay).

El BusWay es la 4ª línea de la red principal de transporte del área metropolitana de Nantes, las otras 3 son líneas de tranvía. Esta línea cuenta con 7 km, de los cuales más de 6 km son de carril reservado, también cuenta con 15 estaciones simples, 8 de intercambio con otras líneas de autobús y una intermodal que le permite conectarse con el tranvía. Este sistema BRT emplea autobuses articulados, en concreto tiene 20.

La inversión necesaria no fue muy grande en comparación con otros modos de transporte: 50 M€ en infraestructuras y 9,3 M€ en vehículos.

Este sistema tiene una serie de características que hacen de él un sistema de transporte muy exitoso, estas son:

- Plataforma reservada en casi todo el itinerario.

- Una gestión de los cruces dando prioridad al BusWay, limitando sin embargo las molestias para la circulación general.
- La creación de verdaderas estaciones (optimización de la subida y bajada de pasajeros, estaciones con andén, marquesinas, equipamientos).
- La creación de 4 aparcamientos de disuasión con 830 plazas en total y estaciones intermodales: reorganización de la red para favorecer la conexión de diferentes modos de transporte.
- Altas frecuencias 4 minutos en hora punta y 6 fuera de ella.

El BusWay de Nantes transporta 28.000 pasajeros al día y 7 millones al año. La línea es muy puntual y funciona correctamente, aunque en su comienzo en el 2006 sobrepasaba su capacidad en las horas punta y estaba muy cerca de hacerlo en las horas valle.

BusWay (Stombussar) Gotemburgo (Suecia)

Gotemburgo es la segunda ciudad más grande de Suecia con algo más de medio millón de habitantes. Su principal actividad económica está relacionada con su puerto, que es el más grande de todos los países nórdicos y por el que pasan la mayor parte de las importaciones y exportaciones de Suecia.

BusWay es un sistema que se implantó para revolucionar el transporte público en Gotemburgo. Cuenta con 4 líneas numeradas del 16 al 19, que están diseñadas para parecerse a las líneas de tranvía, mismo color, frecuencia, decoración y el embarque se puede realizar por todas las puertas al igual que en el tranvía. Además, realizan las mismas paradas que el tranvía, con la diferencia que hacen un mayor recorrido, llegando también, a las zonas más alejadas de la ciudad. La línea 16 que es la más utilizada de todas, ya que lleva a un gran número de jóvenes que estudian o trabajan en el centro de Gotemburgo, utiliza autobuses biarticulados y en las horas punta esta línea se refuerza con un autobús que realiza la estrategia “deadheading”, a la ida recoge a gente y la vuelta la hace sin realizar ni una sola parada y vacío, para reforzar el sentido que este congestionado. Esta línea es muy efectiva, ya que es una de las pocas líneas de transporte público que cubre sus costes sin necesidad de ayuda municipal.

Este sistema cuenta con una flota de autobuses biarticulados de 24 m (para la línea 16) con una capacidad de 165 pasajeros y circulan casi siempre llenos, a pesar de tener unas frecuencias de 3 min, y articulados para el resto de las líneas. Estos autobuses circulan por carriles especiales reservados solo para transporte público y vehículos de emergencia.

Fastway de Crawley (Inglaterra)

Crawley es una ciudad pequeña de apenas 100.000 habitantes. Pero cuenta con el 2º aeropuerto más grande de Reino Unido y es un punto de paso en el eje Londres-Bristol, ya sea por medio de la carretera o del ferrocarril.

Fastway se ideo para conectar la ciudad de Crawley con el aeropuerto y con una zona cercana con una fuerte actividad económica. Fue el primer sistema BRT del mundo construido fuera de una gran ciudad.

Fastway es un sistema de BRT que cuenta con unos autobuses especiales que pueden ser dirigidos manualmente por un conductor o pueden ser guiados automáticamente en unas pistas especialmente diseñadas para ello. Fastway cuenta con 1,5 km de estas vías y unos 6 km de carril reservado. En el centro de la ciudad no siempre tiene un carril reservado, pero lo que sí cuenta a lo largo de todas las rutas, es la priorización semafórica en todas las intersecciones.

Los autobuses son de 12 metros y de piso bajo, para facilitar la subida y bajada de los pasajeros, ayudando así a reducir el tiempo de parada y, por tanto, también el de viaje. A veces, cuando no hay suficientes autobuses para soportar toda la demanda, se utilizan algunos autobuses normales para realizar el servicio, algunos de ellos son de dos plantas.

Para facilitar lo más posible a los usuarios la utilización del servicio, cuentan con una página web donde pueden encontrar toda la información (precios, horarios, etc.) en tiempo real y también hay una aplicación para el móvil. El sistema de pago es mediante una tarjeta inteligente o sin contacto y el pago se realiza antes de entrar en el autobús.

TRAM de Castellón (España)

Castellón de la Plana es la capital de la provincia de Castellón. Tiene una población de unos 180.000 habitantes. Es una zona muy turística, ya que se trata de una zona costera.

El TRAM - Transporte Metropolitano de la Plana (también conocido como TRAM de la Plana, anteriormente TVRCas), es como se denomina el trolebús de tránsito rápido que circula por la ciudad de Castellón.

El trolebús es un autobús eléctrico que toma la energía eléctrica de una catenaria de dos cables superiores y que tiene un lector-guía, formado por unas líneas blancas pintadas en el asfalto y una cámara situada en lo alto del parabrisas del vehículo, que sigue dichas marcas y guía al trolebús. El trolebús no hace uso de vías especiales o rieles en la calzada, por lo que es un sistema más flexible. Cuenta con neumáticos de caucho en vez de ruedas de

acero en rieles, como los tranvías. El trolebús es conducido por un conductor desde su interior, tiene completa preferencia de paso en todas las intersecciones reguladas por semáforo, y una velocidad máxima de 75 km/h.

El proyecto se ha dividido en varias fases, y a la vez, éstas en tramos, que incluyen la creación de una calzada independiente para el trolebús por aquellas avenidas por la que circule, además de su remodelación.

El primer tramo terminado es el de Universitat Jaume I - Parque Ribalta, que une la universidad con el centro de la ciudad. Esta línea se pretende que llegue hasta la zona del puerto, creándose así una línea de trolebús que recorrerá el eje este-oeste de la ciudad. Esta línea tiene una alta frecuencia 5’ en hora punta los días laborables y 8’ en cualquier otra hora, los sábados, domingos y festivos la frecuencia es de 30’.

En las siguientes fases, se quiere conectar por medio de dos nuevas líneas, una costera que una la zona del puerto con el pueblo de Benicasim, y otra que conecte la zona de las estaciones con los pueblos de Almazora, Villareal y Burriana.

El año pasado, el TRAM traslado a más de 875.000 pasajeros, y eso que solo cuenta con dos kilómetros de recorrido y cinco paradas. El autobús en Castellón mueve al año cerca de 4 millones de viajeros.

4.2.3. Sistemas BRT en Asia y Oceanía

O-Bahn Busway de Adelaida (Australia)

Adelaida es la quinta ciudad más grande de Australia con una población de 1.200.000 habitantes. Este sistema fue ideado en la década de los 80 y se aprovechó la infraestructura de un antiguo tranvía y su posterior renovación para convertirlo en un tren ligero (que no resulto posible).

O-Bahn es el bus guiado más largo y rápido del mundo. Es un autobús especial que va por unas vías diseñadas solo para él que tienen una longitud de 12 km, la pista sobre la que circula es muy parecida a una vía de tren, pero en vez de carriles tiene unas planchas de hormigón y unos topes externos a las planchas que sirven de guía para el bus, en conjunto con unos ruedines que van en los laterales del mismo. Por esta pista circula a 100 km/h y es

capaz de transportar 18.000 pasajeros a la hora. Al llegar al centro de la ciudad el autobús se sale de esta pista y sigue su recorrido por las carreteras normales, aunque en algunos puntos de la ciudad también cuenta con carril reservado.

Tiene solo una única estación y dos estaciones intercambiadoras, las tres estaciones disponen de un aparcamiento disuasorio, para que los usuarios puedan dejar su vehículo y montarse en el O-Bahn. Los intercambiadores permiten a los usuarios del autobús cambiarse de línea. La primera estación que está a 3 km del centro de la ciudad. Esta estación no permite el intercambio con otros sistemas de transporte público, solo está diseñado para la subida y bajada de pasajeros. La segunda estación es la intercambiadora que se encuentra a 6 km del centro y permite el intercambio con los autobuses suburbanos. La tercera y última, también es un intercambiador que se encuentra a 12 km del centro y junto a un centro comercial, esta terminal permite conectar los barrios más alejados de la ciudad con el centro de esta.

No utiliza el sistema de pago mediante tarjetas inteligentes o sin contacto, sino que usa billetes (simples, de ida y vuelta, de día, de 10 viajes…), ya que no es imprescindible como en cualquier otro sistema BRT en el que las paradas estén más juntas.

BRT en Sídney (Australia)

Sídney es la ciudad más grande de Australia con casi 4 millones y medio de habitantes. Tiene una extensa red de transporte público que cuenta con: metro, monorraíl, buses, tren y ferris. Además de eso la ciudad de Sídney cuenta con tres sistemas BRT: Metrobus, North-West T-way y Liverpool-Parramatta T-way.

El Metrobus tiene como intención unir las principales zonas de trabajo situadas en los

barrios más alejados con el centro, sin necesidad de que el autobús realice paradas en los barrios intermedios. Esto lo hace realidad gracias a las 13 rutas que tiene en operación. El Metrobus es un sistema BRT ya que el servicio es realizado mediante autobuses articulados (100 autobuses) de 115 plazas y autobuses de 90 plazas (190 autobuses) , el pago se realiza automáticamente antes de entrar en el autobús y los usuarios están continuamente informados gracias a las pantallas que hay tanto dentro del autobús como en las paradas. Todos los autobuses están equipados con equipos de CCTV (circuito cerrado de televisión), son de piso bajo para facilitar el acceso a personas con movilidad reducida y son poco contaminantes.

El North-West T-way une los barrios del noroeste entre sí y con el centro, gracias a su forma de T. Tiene una longitud de 21 km de carril bus, que se construyeron totalmente nuevos para este proyecto y 3 más de la red ya existente. Para el correcto funcionamiento del North-West T-way, se construyeron 30 estaciones, 10 nuevos puentes y 2 pasos subterráneos para evitar las intersecciones a nivel, ya que siempre son puntos susceptibles de sufrir atascos y accidentes. El Liverpool-Parramatta T-way une los barrios del oeste entre sí y con el centro, y al igual que el North-West T-way tiene forma de T. La línea tiene una longitud de 30 km y existen 35 estaciones a lo largo de ella.

Los T-way se concibieron como una alternativa al tren de cercanías, ya que tienen un menor coste de infraestructuras y tienen una mayor área de influencia, ya que el autobús se puede salir de la ruta marcada para recoger a más pasajeros en función de la demanda. Todas las estaciones de Sídney están altamente equipadas con: cámaras de CCTV, amplia iluminación, pantallas que informan en tiempo real de las salidas y llegadas, información en

tiempo real digital, fácil accesibilidad, aparcamientos de bicicletas, etc.

TransJakarta Yakarta (Indonesia)

Yakarta es la capital de Indonesia y una de las ciudades más pobladas del mundo con más de 8 millones y medio de habitantes y unos 19 millones en su área metropolitana. Tiene una grandísima densidad de población (11.300 hab/km^2).

Actualmente es la red de BRT más larga del mundo con 172 km, es usada por aproximadamente 340.000 personas al día y cuenta con más de 520 autobuses en operación. La mayoría de los autobuses son de 80 plazas, aunque en hora punta este número se suele superar. También hay autobuses articulados, que realizan su servicio en los corredores más largos. Casi todos los autobuses tienen un motor que funciona a base de biodiesel, pero hay unos pocos que utilizan como combustible GNC. Para aumentar el confort de los pasajeros durante el viaje, los autobuses cuentan con aire acondicionado y con un sistema que dispensa perfume, que es muy útil, sobretodo en horas punta.

Los autobuses circulan por un carril reservado, separado por el resto de carriles mediante bloques de hormigón. Por estos carriles solo pueden circular los vehículos del TransJakarta y vehículos de emergencias, aunque se permite al resto de vehículos invadir el carril bus en las intersecciones solo para realizar algunos giros. Esto en un principio generó muchos problemas y accidentes, ya que los peatones cruzaban el carril bus y los vehículos que no son del TransJakarta utilizaban el carril bus, sobre todo en las horas punta. Para evitar esto, se cambió el sentido de circulación de los autobuses, yendo así en dirección contraria al resto del tráfico.

Las estaciones están algo elevadas para que estén al mismo nivel que los autobuses, que son de piso alto. Para acceder a las estaciones hay escaleras y rampas con poca pendiente, para permitir el acceso a personas con movilidad reducida, el problema de estas rampas es que, a veces, hay que dar grandes vueltas. Casi todas las pasarelas son metálicas, lo cual crea varios problemas uno es que hacen mucho ruido al pasar los peatones por ellas y otro es que durante la estación lluviosa suelen ser muy resbaladizas. No hay baños en la mayoría de las estaciones. Las estaciones suelen estar superpobladas ya que hay problemas con los grandes tiempos de espera, de hecho es una de las mayores quejas que hay sobre el sistema.

Los billetes se compran antes de entrar en el autobús, de hecho, se piden para entrar en la estación. El sistema es muy parecido al de los sistemas de metro, en el que tú pagas por entrar en la estación y siempre que no te salgas de ellas puedes realizar todos los viajes que quieras. Se quiere implantar tarjetas de las cuales al pasar por el control te descuentan el precio del billete y que además te permitan, también, el pago en los trenes de cercanías.

Para evitar muchos problemas, se pretende instalar 4 cámaras de seguridad en cada autobús. Con estas cámaras se quiere reducir el número de robos, prevenir los acosos sexuales e informar a los pasajeros en las estaciones si un autobús está lleno.

5. COSTES DE EXPLOTACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO

5.1. Costes de operación del transporte público.

Los costes de operación del transporte público corren a cuenta del operador del mismo y se consideran como la suma de los Costes Directos más los Costes Indirectos (Ibeas et al., 2006).

Los Costes Directos (CD) se componen de cuatro factores:

- Costes de rodadura (km recorridos) (CK).
- Costes horarios debidos al ralentí (CR).
- Costes de personal (CP).
- Costes fijos (CF).

Los Costes Indirectos (CI) engloban, entre otros, los siguientes costes:

- Costes generales: administración, estructura, marketing, publicidad, otros.
- Costes comerciales: Personal venta al público, comisiones, electricidad, correo, otros.

En base a Ibeas et al., (2006) se pueden suponer del orden del 12% de los Costes Directos.

Por lo tanto, la estructura general de costes de operación se puede expresar como:

$$C_o = CD + CI \Rightarrow 1.12 \cdot CD \Rightarrow 1.12 \cdot \left(CK + CR + CP + CF \right) \quad (4.1)$$

El coste total de los kilómetros recorridos será función de la longitud de cada línea de transporte público, del número de servicios durante la hora de simulación y del tipo de autobús que se disponga en cada servicio. Con esto, el coste de rodadura (CR) será igual a:

$$CK = \sum_{l} \sum_{k} L_l \cdot f_l \cdot Ck_k \cdot \delta_{l,k} \quad (4.2)$$

dónde:

L_i = Longitud de la línea *l* (km).

f_i = frecuencia de la línea *l* (bus/h).

Ck_k = coste unitario por kilómetro de rodadura del autobús tipo *k* (€/km).

$\delta_{l,k}$ = variable binaria que toma valor 1 si la línea *l* tiene un autobús tipo *k* y 0 en caso contrario.

El coste de los autobuses en ralentí (CR) será función del tiempo que éstos estén detenidos con el motor en marcha, con lo que, simplificando, se computan los tiempos de detención en paradas de bus debidos a la carga y descarga de viajeros. Por lo tanto, se puede expresar como:

$$CR = \sum_k \left(\sum_l \sum_n TBS_{l,n} \right) \cdot Cr_k \cdot \delta_{l,k} \qquad (4.3)$$

dónde:

$TBS_{l,n}$ = tiempo total de parada del bus de la línea *l* en la parada *n*.

Cr = coste horario en ralentí del autobús (€/h).

Por su parte, en una primera aproximación, la demora en cada parada de bus (*TBS*) estará relacionada con la demanda de cada línea *l* en cada parada *n*:

$$TBS_{l,n} = \left[\max\left(Y_{l,n} \cdot t_s ; X_{l,n} \cdot t_b \right) + \left(t_{o,c} / 60 \right) \cdot f_l \right] \qquad (4.4)$$

donde:

t_s = tiempo promedio de subida de los pasajeros (h).

t_b = tiempo promedio de bajada de los pasajeros (h).

$Y_{l,n}$ = demanda de viajes de la línea *l* y origen en la parada *n* que se obtiene de la asignación (pax/h).

$X_{l,n}$ = demanda de viajes de la línea l y destino la parada *n* que se obtiene de la asignación (pax/h).

$t_{o,c}$ = tiempo promedio perdido de apertura y cierre de puertas y en las maniobras de entrada y salida del área de parada por cada bus (min).

El coste de personal se considera directamente proporcional al número de autobuses en servicio en la hora punta, que a su vez será función del tiempo de ciclo de cada línea entre su intervalo:

$$CP = Cp\sum_{l} round^{+}\left(tc_l / h_l\right) \quad (4.5)$$

donde:

Cp = es el coste unitario por hora del personal (€/bus).

tc_l = es el tiempo de ciclo de la línea *l* (min).

h_l = intervalo de la línea *l* (min).

Los costes fijos se calculan con la siguiente formulación considerando los autobuses que están circulando:

$$CF = \sum_{l}\sum_{k} round^{+}\left(tc_l / h_l\right)\cdot C_{f_k}\cdot \delta_{l,k} \quad (4.6)$$

donde:

C_{f_k} = es el coste fijo por hora del bus tipo k.

5.2. Coste de construcción de las paradas.

Los costes de construcción (o destrucción si fuese el caso) de las paradas se omiten en la función objetivo. Esta hipótesis no se considera desacertada puesto que su coste es sufragado en muchos casos por la empresa concesionaria de los derechos publicitarios en las mismas. En todo caso, su incorporación al modelo no sería más que añadir un término de coste por cada parada en la función objetivo, multiplicado por el número de nuevas paradas.

$$C_c = \sum_{l} m_l \cdot c_m \quad (4.7)$$

Donde:

m_l = número de paradas en la línea *l*.

c_m = coste de construcción de cada parada.

5.3. Evaluación de los costes unitarios

El objetivo de este apartado es el determinar los costes unitarios imputables a los tres grupos principales de costes que se presentan en una empresa de transporte público de viajeros: costes de rodadura, coste personal y costes fijos.

Estos tres grupos componen lo que se conoce como el coste directo de la empresa. A este último, posteriormente se le añade el coste indirecto representado por todos aquellos costes que no son directamente asignables al servicio, componiendo así el coste total de la empresa de transporte de viajeros.

Por lo tanto se presenta en este primer apartado, el sistema de asignación de Costes Directos para una empresa de transporte urbano, aplicado en el presente estudio económico-financiero.

Es de destacar que en este primer apartado, se podría haber tomado los costes unitarios de rodadura, personal y fijos de una empresa medio tipo, pero en la literatura especializada se ha demostrado que no tienen por qué ser iguales para empresas de distintas tamaños, por lo que el equipo redactor ha optado por determinar lo más aproximadamente posible los costes unitarios particulares para una empresa que realizará el sistema de transporte urbano propuesta para Santander.

La metodología que se va a seguir para el tratamiento de los Costes Directos será la siguiente:

1ª ETAPA: Se analizarán los distintos *factores de coste* en que se incurren a la hora de realizar un servicio de transporte urbano como el propuesto para Santander. Para ello, hay que basarse en una clasificación de los costes, así como en una asignación temporal de los mismos.

2ª ETAPA: Una vez se tengan determinados los *factores de coste*, se van a referir éstos a unas unidades de producción acordes con la actividad que se realiza (unidades de producción que se denominarán *parámetros físicos de coste*).

En la imagen que se muestra a continuación (Figura 10.1), se refleja de forma gráfica la metodología que se va a seguir para alcanzar el objetivo perseguido:

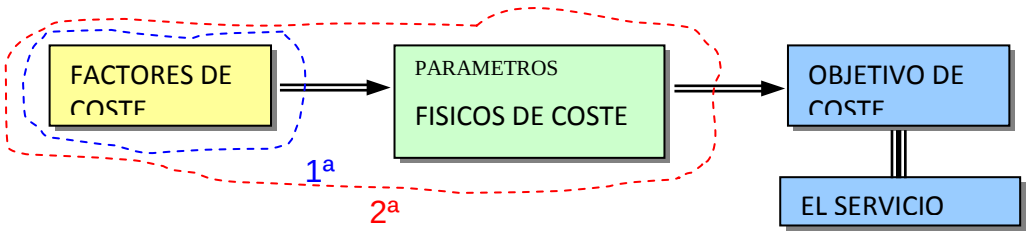


Fig. 10. Etapas de la metodología desarrollada

A continuación se van a ir desarrollando individualmente cada una de las etapas del proceso.

PRIMERA ETAPA: Análisis de los Factores de Coste.

Basándose en la definición de Costes Directos, éstos se podrán localizar directamente en los diferentes servicios prestados por la empresa. Por ello, una primera labor a realizar es la localización e identificación de los costes directos que hay en la empresa.

En la tabla siguiente (Tabla 9.1), se presentan los *factores de coste* que aquí se van a tratar, que son los referentes a los Costes Directos.

	COSTES FIJOS	COSTES VARIABLES
C. DIRECTOS	✓ Seguro del vehículo ✓ Amortización del bus, tributos, tasas... ✓ Retribuciones fijas del personal de conducción (conductores). ✓ Algunos costes comerciales fijos asociados a la prestación de un servicio determinado	✓ Retribuciones variables del personal de conducción (Conductores) ✓ Combustible ✓ Lubricantes ✓ Neumáticos ✓ Mantenimiento vehículos (materiales y mano de obra) ✓ Algunos Costes Comerciales (los que sean directamente del servicio)

Tabla 11. Descomposición de los costes Directos en Fijos y Variables

Generalmente y para simplificar, vamos a agrupar estos Costes Directos en tres grandes grupos de costes. De forma genérica distinguimos estos tres grandes grupos:

- Costes del factor consumo ⇒ denominados también COSTES DE RODADURA (CR) que son proporcionales al uso (movimiento) del vehículo:
  - El consumo de combustible.
  - El consumo de lubricante.
  - El consumo de neumáticos.
  - El mantenimiento y las revisiones.
  - Las reparaciones.
  - El taller.

- Costes del factor trabajo ⇒ denominados también COSTES DE PERSONAL (CP) y que incluyen únicamente el coste del personal que va en el autobús, pudiendo ser:
  - Conductor.

- Costes de factores fijos ⇒ denominados COSTES FIJOS (CF) y entre los que se incluyen:
  - Seguros del vehículo.
  - Amortizaciones-financiaciones de los vehículos.
  - Inspecciones técnicas, tasas y tributos del vehículo, Etc.

Estos últimos son costes fijos relacionados con los vehículos y que, por tanto, no dependen de que éste ruede o no. Simplemente se producen por el mero hecho de tener un vehículo dispuesto para circular y autorizado para realizar transporte público.

Es evidente, que esta agrupación de los costes directos es plenamente intencionada, pues lo que se pretende es relacionarlos directamente con tres parámetros físicos de obtención inmediata y sencilla en las empresas: *los kilómetros recorridos (factor energía), las horas invertidas (factor trabajo) y los vehículos utilizados en cada servicio (factor capital).*

El coste de mantenimiento lo incorporamos en el grupo de costes de rodadura, por su proporcionalidad al uso del vehículo en cuanto a kilómetros recorridos por este, en mayor grado que al tiempo de utilización. A su vez, el coste de mantenimiento encierra detrás un consumo de horas-hombre de taller y de materiales. Consideraremos pues, esta actividad como industrialmente diferente y englobada en un servicio proveedor del transporte, ligado al uso de los vehículos.

Volviendo a nuestro razonamiento inicial, una vez establecidos los factores de coste en que incurren las empresas de transporte de viajeros, *la función de coste directo* que resulta es la siguiente:

$$Z_{TOTAL}\ [\text{euros}] = CR + CP + CF$$

Esta será la función de coste general que se tomará como base para la realización de las diferentes formulaciones de la 2ª Etapa que se presenta en el siguiente apartado.

Por último, como costes directos no incluidos en ninguno de los grupos anteriores, pero que son directamente imputables a los servicios (Costes Directos), estarían los pagos de canon de estación por el uso de éstas o los pagos de estacionamientos (parking), los tres ligados al uso de infraestructuras. Este tipo de costes tiene más sentido en líneas de transporte interurbano que en un sistema de transporte urbano, por ello no han sido incluidas.

Así mismo, están las dietas del personal de a bordo (conductores) que no se tiene en cuenta porque se supone la ausencia de ellas en este tipo de transporte urbano.

Estos costes son específicos con cada servicio, y se pueden sumar directamente a la fórmula anterior o incluirlos en uno de los términos anteriores de forma proporcional.

SEGUNDA ETAPA: Imputación de los Factores de Coste a las unidades de producción (Parámetros Físicos de Coste).

Una vez que se han determinado los factores de costes y una vez ya periodificados, el segundo paso en la metodología desarrollada consiste en referir éstos a los parámetros físicos de coste.

Para ello, lo primero que se ha de definir es cuáles son los parámetros de coste que se van a emplear. De acuerdo a la naturaleza de la actividad del transporte de viajeros, las unidades básicas de producción (o *parámetros físicos de coste*) escogidas son tres:

- Número de kilómetros-bus totales recorridos por la empresa = K
- Número de horas-hombre totales trabajadas por la empresa = H
- Número de días-bus de la empresa = B

Las razones para escoger estos tres parámetros estriban en su facilidad para relacionarlos con la mayoría de los costes de la actividad de forma racional y lógica, por un lado y, por otro, la inmediatez y facilidad de su obtención en todas las empresas con un simple sistema de recogida de información de horas y kilómetros por servicio, fácilmente mecanizable y automatizable.

En cuanto al día-bus, se trata de incorporar el factor tiempo en el uso del vehículo o "máquina de transporte" (factor capital) que, será el que absorba los costes fijos de ésta.

Hay que tener en cuenta una singularidad de la llamada "máquina de transporte", y

es que ésta puede ser productiva rodando o no, y puede usarse 24 horas al día o sólo 8, siendo igualmente rentable. Es decir, el deterioro de la máquina se produce por la acción conjunta del paso del tiempo y de su uso en kilómetros recorridos, por lo que su productividad debe medirse no sólo en kilómetros recorridos en un tiempo determinado, sino en horas útiles o de uso.

Una vez definidos los factores de coste y los parámetros físicos de coste, lo que hay que hacer es imputar los primeros a los segundos.

Lo que se propone es asignar cada grupo de factor de coste (recuérdese Costes de Rodadura, de Personal y Costes Fijos) a uno de los tres parámetros físicos de coste definidos (número de kilómetros, horas de servicio y número de vehículos de la empresa).

Se parte de una función de coste general de la forma:

Z_{TOTAL} [euros] = CR + CP + CF

Asignando los Costes de Rodadura a los kilómetros realizados, los de Personal a las horas de servicio y los Costes Fijos al número de vehículos, queda una función de costes de la empresa de la siguiente forma:

$$Z_{empresa} = \frac{CR}{K} + \frac{CP}{H} + \frac{CF}{B} = cr_u + cp_u + cf_u$$

La asignación de un *factor de coste* a un *parámetro físico* determinado se hace en función de la relación que hay entre ambos, es decir, los Costes de Rodadura, por ejemplo, se asignan a los kilómetros recorridos ya que el gasto en combustible, lubricante, etc. será tanto mayor cuanto más volumen de actividad realice la empresa (es decir más kilómetros se recorran). Análogamente con los otros factores de coste.

De esta forma, se puede decir que los costes unitarios de la empresa están formados por tres sub-funciones de la forma:

$Z_{empresa} = Z_1 + Z_2 + Z_3$

$$Z_1\ [\text{Euros/km.}] = \frac{\text{Costes directos imputables a Kms.}}{\text{nº Kms realizados por la empresa}} = \frac{CR}{K}$$

$$Z_2\ [\text{Euros/hora}] = \frac{\text{Costes directos imputables a horas}}{\text{nº horas de servicio}} = \frac{CP}{H}$$

$$Z_3\ [\text{Euros/bus}] = \frac{\text{Costes directos imputables a vehículos}}{\text{nº de vehículos en la empresa}} = \frac{CF}{B}$$

Una vez que se dispone de esta función de costes de la empresa, obtener la función de coste por cada una de los servicios que conforman la misma es muy sencillo, pues solamente hay que conocer el número de kilómetros recorridos por cada uno de ellos, el número de horas del servicio y referir los costes fijos a una unidad de tiempo determinada. Así se tendría:

$$Z_{\text{servicio}} = cr_u \cdot k + cp_u \cdot h + cf_u \cdot b$$

k = nº de kilómetros recorridos por el servicio

h = nº de horas realizadas en el servicio

b = nº de autobuses del servicio

De esta forma se obtendría el coste directo por cada servicio. La suma de los costes directos de todos los servicios de la empresa será igual al total de los costes directos obtenidos en el balance de ésta (con las salvedades de los diferentes criterios contables y analíticos usados en determinadas partidas):

$$\sum_{i=1}^{i=n} Z_{\text{servicio "i"}} = Z_{\text{TOTAL}}$$

Con el modelo de costes aquí propuesto, se ha conseguido asignar los Costes Directos

que se generan en una empresa de transporte urbano de viajeros a los parámetros físicos que producen esos costes. Se puede ya, por tanto, a partir de estos costes, estimar los costes indirectos de la misma, así como los potenciales ingresos por billetes vendidos y obtener la rentabilidad del sistema de transporte urbano propuesto.

6. APLICACIÓN PRÁCTICA: CASO DE SANTANDER

6.1. Descripción del caso de estudio.

La aplicación práctica de esta investigación se centra en el transporte público de la ciudad de Santander. A continuación se plantean una serie de características del ámbito de estudio con el fin de comprender mejor el posible comportamiento de los usuarios del transporte público de esta ciudad.

6.1.1. Situación y emplazamiento

La ciudad de Santander es la capital de la Comunidad Autónoma de Cantabria. Se encuentra situada al norte de la misma; estando, a su vez, enmarcada en la zona septentrional de la Península Ibérica conocida como Región Cantábrica (ver figura 11).

Figura 11: Situación del Término Municipal de Santander.
(Fuente: PGOU de Santander).

El término Municipal de Santander ocupa una superficie relativamente pequeña (comparada con el resto de capitales de provincia de España), con 36 km2, siendo esta superficie algo menos del 1% de la superficie de la región. Al norte limita con el Mar Cantábrico, estando rodeada de mar en gran parte de su contorno, ya que la ciudad está

diseñada de cara al mar, tanto en la zona de la bahía interior, como en la zona de las playas.

En cuanto al relieve de la ciudad, este se caracteriza por una alternancia de elevaciones y depresiones paralelas en dirección noroeste-sureste. La diferencia de cotas entre unas y otras no son muy elevadas, pero sí son suficientes para condicionar la movilidad de la ciudad en esa dirección, ya que las pendientes a las que dan lugar llegan a ser de tipo fuerte (mayor de 15^{o}, MOPUT 2001). Además, la ciudad se caracteriza por una escasa red de viales principales en la dirección mencionada previamente, lo que dificulta aún más la movilidad.

La zona en la que aparecen las mayores pendientes y las mayores cotas está al suroeste: la peña de Peñacastillo, que alcanza una cota superior de 135 metros. Las zonas más llanas y con alturas menores se localizan principalmente en la parte sur de la ciudad y se deben, en gran medida, a sucesivos rellenos destinados ganar terreno al mar con el fin de acoger actividades industriales y comerciales así como la actividad portuaria desarrollada en el Puerto de Raos (véase Figura 12).

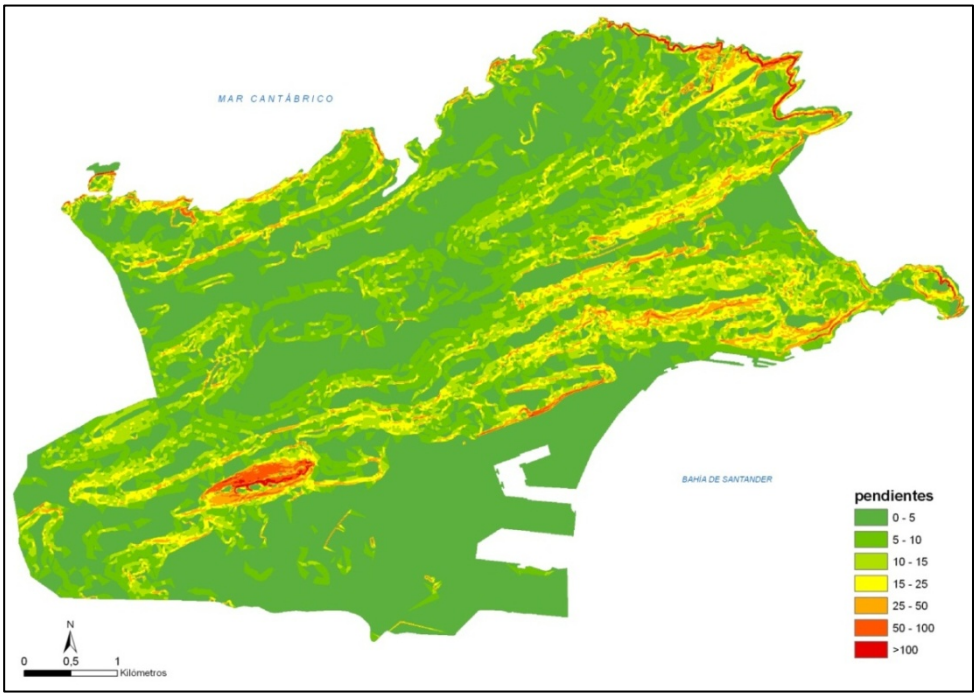


Figura 12: Topografía del municipio de Santander, mediante pendientes.

(Fuente: propia. Escala 1:25.000.)

6.1.2. Población

La población actual, según el último dato del Padrón municipal publicado (a 1 de Enero de 2010) es de 182.700 personas. El municipio cuenta con cinco núcleos de población, el casco urbano de Santander y cuatro pueblos colindantes a este: Cueto, Monte, Peñacastillo y San Román, que progresivamente han sido asimilados por el casco urbano debido a la expansión de la población hacia la zona periurbana.

La distribución de la población sobre el territorio es bastante desigual (véase Figura 13). El núcleo urbano, especialmente su zona centro, concentra las mayores densidades.

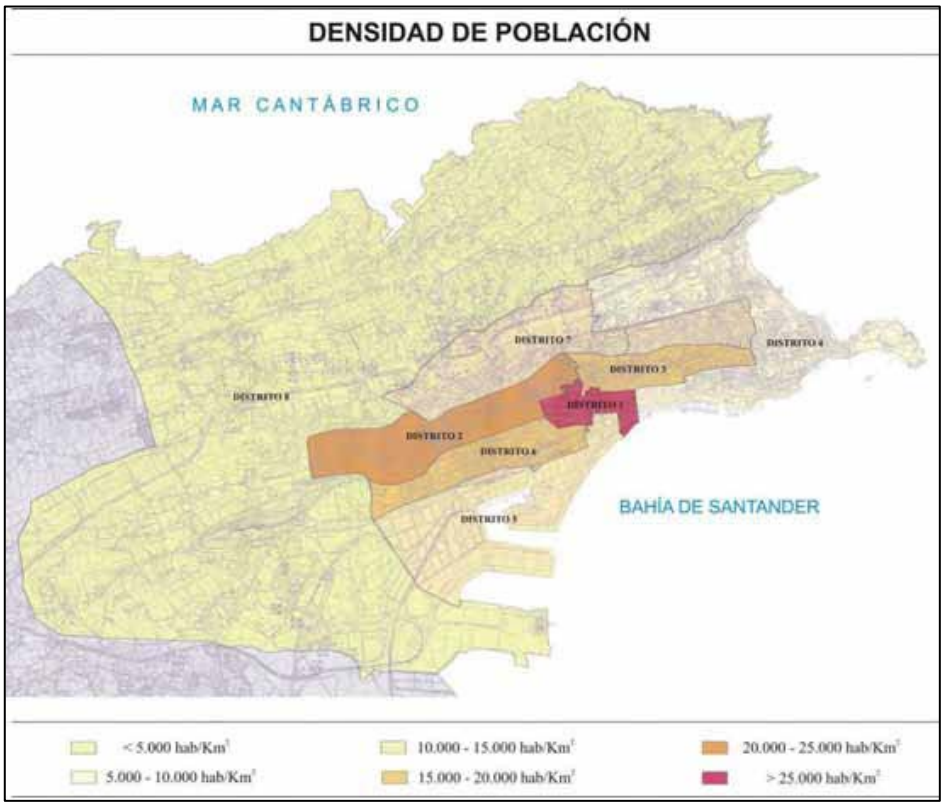


Figura 13: Densidad de población en los distritos censales del municipio de Santander.

(Fuente: PGOU de Santander).

A nivel general la cantidad de población en el municipio ha permanecido prácticamente constante en la última década, aunque se ha experimentado una ligera disminución (frenada en parte según los últimos datos de 2008 y 2009) por los procesos de periurbanización y dispersión urbana presentes en muchas otras ciudades españolas (véase Figura 14).

AÑOS	Población
1950	102.462
1960	118.435
1970	149.704
1981	180.328
1991	196.218
2001	180.717
2004	183.799
2005	183.955
2006	182.926
2007	181.802
2008	182.302
2009	182.700

Tabla 1: Evolución de la población de Santander en los últimos 50 años.

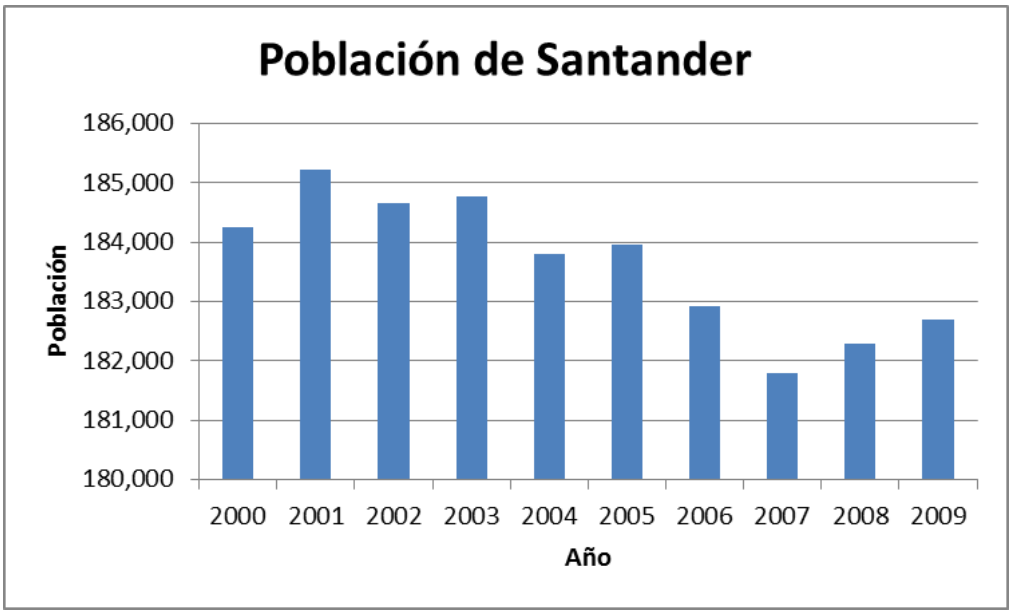


Figura 14: Evolución de la población del municipio de Santander (2000-2009)

(Fuente: Padrón municipal. Instituto Nacional de Estadística (INE))

6.1.3. Economía

La mayor parte de la población activa con trabajo, del municipio de Santander, se dedica al sector servicios o sector terciario. Según datos obtenidos del PGOU, el 76% de la población está asociada, laboralmente, al sector servicios, es decir, 3 de cada 4 empleados

dependen del sector servicios.

El sector primario ocupa solamente al 1,2% de la población trabajadora, es decir, las actividades relacionadas con la ganadería, la agricultura y la pesca son claramente minoritarias en la ciudad.

El porcentaje que se dedica a desarrollar su labor profesional en el plano industrial es muy semejante al porcentaje que se dedica a desarrollar su labor en la construcción (12,9% y 9,8% respectivamente (ver tabla 2). Es decir, la actividad industrial y la construcción son sectores que no destacan tampoco especialmente en Santander.

Sector económico	Porcentaje
Sector Primario	1.2
Construcción	9.8
Industria	12.9
Servicios	76

Tabla 2: Tanto por ciento de población según sector económico.

(Fuente. PGOU de Santander).

6.1.4. Transportes

Como en la mayoría de las ciudades de nuestro entorno, hoy en día, el principal modo de transporte es el vehículo privado motorizado. En el caso particular de Santander, los desplazamientos en bus y a pie también tienen un porcentaje importante dentro de la movilidad urbana.

Las infraestructuras disponibles en la ciudad de cara a la conexión tanto con el resto de la provincia como con el resto del país, han mejorado notablemente en la última década. De forma especial en lo que se refiere a los viales que conectan con la autovía del Cantábrico como, por ejemplo, la autovía S-20. Estos han permitido que gran parte del tráfico procedente del sur y del este de Cantabria que sólo tenían una forma de llegar a Santander: la entrada de la zona sur de la ciudad (donde se concentra el tráfico portuario), tengan otra forma de acceso a la ciudad. Otra obra importante a este respecto es la Ronda de la Bahía, que ha ayudado también a descongestionar la entrada sur de la ciudad, mejorando notablemente la circulación en los viales de la ciudad que dan paso a esta entrada (ver Figura 15).

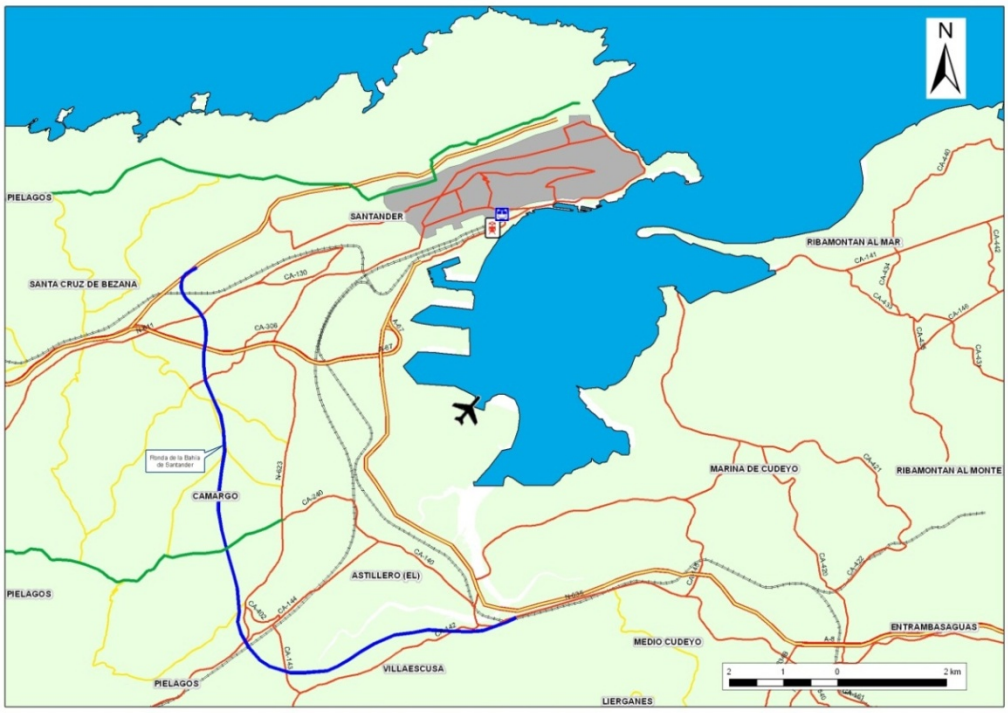


Figura 15: Red viaria del área metropolitanita de Santander.

(Fuente: Elaboración propia).

Otra forma de acceder a la ciudad es mediante el transporte público, bien sea en bus interurbano bien sea en ferrocarril. La Estación Municipal de Autobuses y las estaciones ferroviarias de RENFE y FEVE se encuentran concentradas en el mismo punto de la ciudad, facilitando en todo momento la intermodalidad entre ambos modos de transporte. Además, el transporte público urbano de Santander conecta esta área con el resto de la ciudad mediante servicios diarios de bus. A pie también se puede acceder al centro de la ciudad, caminando, a través del Pasaje de Peña, que conecta directamente esta área intermodal con el Ayto. de Santander.

La Estación Municipal de Autobuses da servicio diariamente a 810 autobuses, de ellos 460 son de cercanías o regionales, mientras que 350 son de medio o largo recorrido (incluyendo viajes internacionales).

FEVE dispone de tres líneas, una en dirección a Bilbao, otra hacia Oviedo y otra hacia Liérganes, mientras que RENFE presenta servicios de cercanías hasta Reinosa, en el límite provincial, así como transporte de largo recorrido hasta distintas provincias del interior como Valladolid y Madrid.

El transporte público de esta ciudad está formado, actualmente, por 18 líneas; 6 de esas líneas son circulares (5C1, 5C2, 6C1, 6C2, 7C1 y 7C2) pudiendo ser agrupadas en 3 líneas, ya que operan en la misma línea pero en distinto sentido (ver Figura 16). Además cuenta con 3 líneas de servicio nocturno que funcionan los viernes y los sábados. Este conjunto de líneas da cobertura a prácticamente todo el territorio de esta ciudad.

El conjunto de líneas que forma el transporte público colectivo de la ciudad se observa en la siguiente figura:

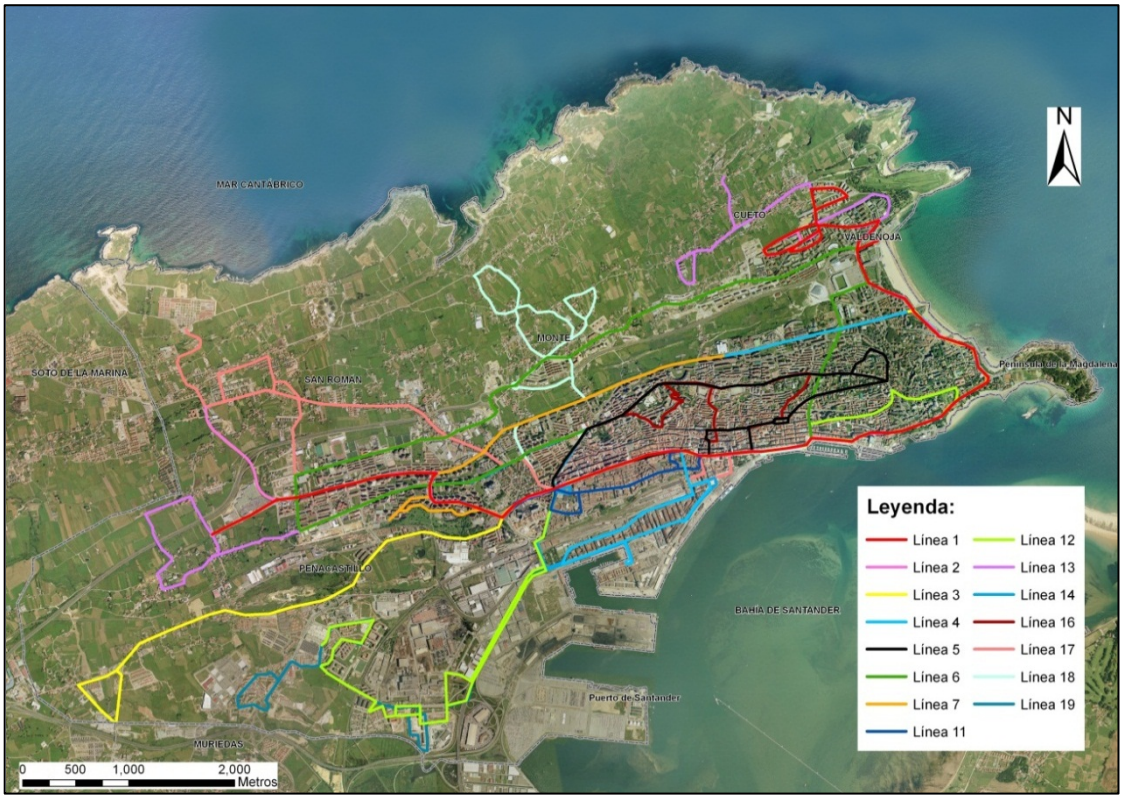


Figura 1: Mapa de líneas de la ciudad de Santander

(Fuente. Elaboración propia)

En la actualidad, prácticamente la totalidad de la población de Santander tiene disponible un parada de bus a 300 metros como máximo (ver Figura 17). En 2008, el número de viajes realizados en el TUS ascendió a 20 millones.

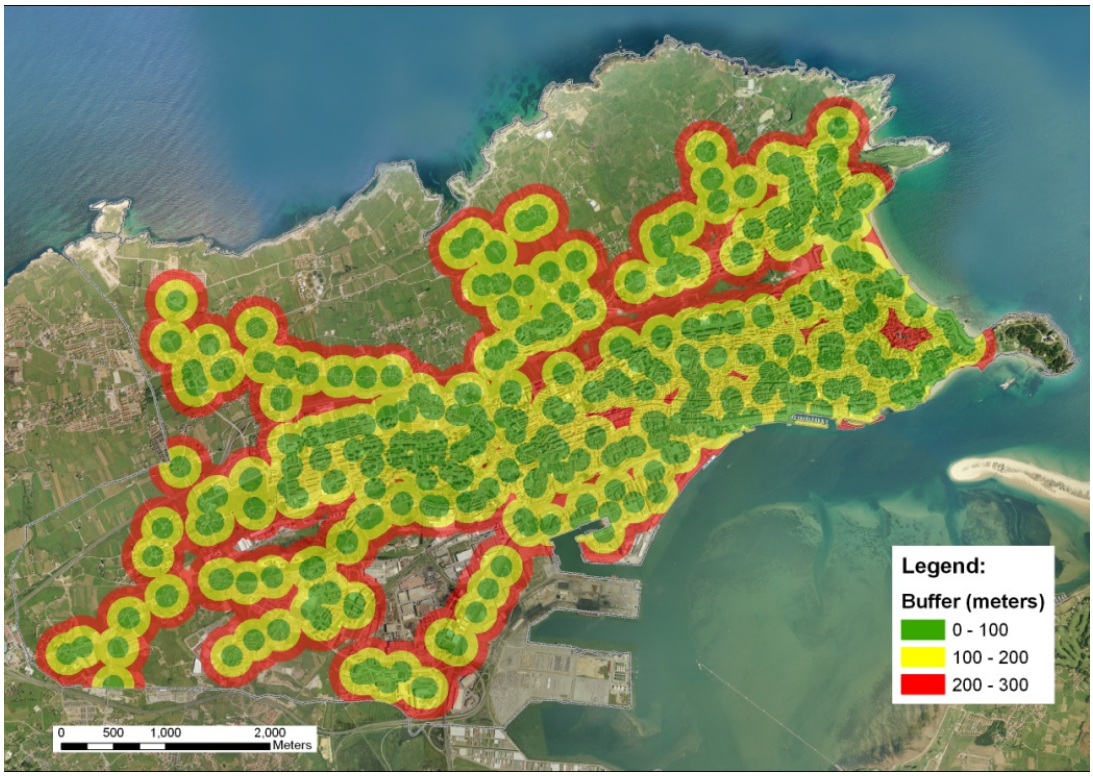


Figura 2: Mapa de cobertura de paradas en la ciudad de Santander

Fuente. Elaboración propia

En cuanto al reparto modal de Santander, actualmente el modo de transporte principal es el coche, que tiene asociada casi la mitad de los viajes diarios de la ciudad. La segunda forma más común de desplazarse en la ciudad es el modo a pie, con un 36%. El bus es utilizado en el 14% de los viajes diarios. Otras ciudades más conocidas y con un reparto modal semejante al de Santander son, en España, Sevilla y, en Europa, Graz (Austria). Ambas ciudades tienes un reparto muy semejante en cuanto al coche y el bus se refiere. Sin embargo, Graz se diferencia de Sevilla y Santander en el porcentaje que afecta a los modos bici y al modo pie. En la ciudad austriaca el reparto entre estas dos formas de desplazarse es más equitativo (A pie: 195, en bici: 14%) que en las dos ciudades españolas, donde el porcentaje actual de usuarios de bici no llega al 1%. Estos datos se muestran en la tabla siguiente:

	Porcentaje de viajes por modo (%)				
	A pie	Bus	Coche	Bicicleta	Otros
Santander[1]	36%	14%	46%	0%	4%
Sevilla[2]	31%	12%	50%	0%	7%
Graz[3]	19%	19%	48%	14%	0%

Tabla 3: Reparto modal en Santander, Sevilla y Graz

Con el fin de realizar un estudio lo más completo posible se han realizado encuestas sobre toda la red de líneas del transporte público colectivo, obteniendo datos a lo largo de toda la ciudad. El objetivo es comprobar la influencia en la calidad, tanto percibida como deseada, tanto de la línea en sí como del recorrido realizado (pudiendo tener en cuenta las zonas por las que circula a la hora de realizar el estudio).

Aunque el análisis se ha realizado para todas las líneas de transporte público de Santander, en esta tesis se va a exponer en profundidad los resultados obtenidos para cuatro de las líneas: las dos con mayor demanda de pasajeros y las dos con menor demanda. Así mismo se presentarán también los resultados obtenidos para el análisis global de los resultados (teniendo en cuenta a todas las líneas del sistema de transporte público colectivo), pudiendo comprobar así la necesidad o no de realizar un estudio pormenorizado por cada una de las líneas existentes por separado.

Las líneas que van a formar parte de esta exposición son:

- Línea L1
- Línea L5C1 (circular)
- Línea L11
- Línea L14

[1] Datos obtenidos de una encuesta domiciliaria realizada en Santander (Noviembre, 2008) para el proyecto "PRO-BICI. Metodologías de planificación y gestión de estrategias de promoción de la bicicleta". CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas).

[2] Datos de la movilidad en Sevilla obtenidos del documento "Observatorio de la Movilidad Metropolitana" (2009). Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

[3] Datos de la movilidad en Graz obtenidos de FGM 2008, Mobilitätsverhalten der Grazer Wohnbevölkerung .

Siendo las dos primeras las líneas con mayor demanda de viajeros del sistema de transporte público colectivo de Santander, y las dos últimas las líneas con menor volumen de pasajeros del sistema.

A continuación se adjunta la tabla en la que se muestran los pasajeros en un día medio de invierno (se ha elegido un día medio de la semana en la que se realizaron las encuestas en los autobuses de la ciudad):

Línea	Transbordos	TOTAL VIAJEROS
L1	677	9,648
L2	520	6,694
L3	218	3,718
L4	417	3,861
L5C1	544	4,807
L5C2	379	4,710
L6C1	134	1,902
L6C2	117	1,812
L7C1	330	3,588
L7C2	256	2,969
L11	54	284
L12	268	3,416
L13	193	2,940
L14	57	830
L16	71	1,196
L17	107	1,628
L18	106	1,466
L19	69	1,043
Total	4,517	56,512

Tabla 4: Pasajeros, en un día tipo, en las distintas líneas del TUS

A la vista de los datos se comprueba que las dos líneas con más volumen de pasajeros son la L1 y la L5C1 (circular), mientras que las dos líneas con menos volumen de pasajeros con la L11 y la L14.

A continuación se presenta un plano de la ciudad de Santander con las 4 líneas elegidas para focalizar este estudio (ver figura 18) así como una tabla con la longitud de cara línea. Las dos líneas con mayor volumen de pasajeros, L1 y L5C1, dan cobertura a un área

bastante más amplia que las líneas L11 y L14. Además, las líneas L1 y L5C1 pasan por eje principal de la ciudad, mientras que las líneas L11 y L14 dan cobertura a zonas un poco más apartadas (trasversales del eje central).

Línea		Longitud (m)
L1	Ida	13.356
	Vuelta	12.868
L5C1		7.525
L11	Ida	1.907
	Vuelta	2.214
L14	Ida	4.438
	Vuelta	5.315

Tabla 5: Tabla resumen de la longitud de cada línea

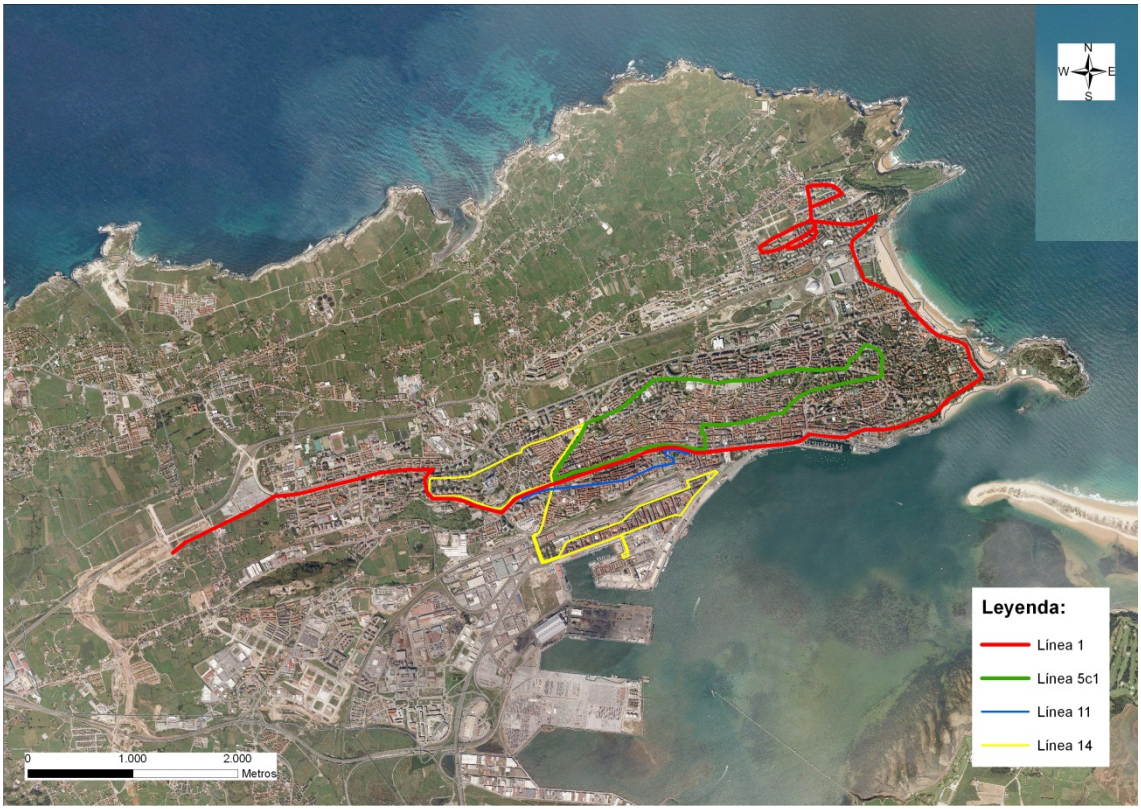


Figura 3: Plano de la ciudad de Santander con las líneas estudiadas en profundidad: L1, L5C1, L11 y L14.

6.2. Caracterización de los usuarios y de los potenciales usuarios del Transporte Público.

Antes de comenzar con la modelización de los datos como tal es fundamental realizar una explotación de los mismos, obteniendo con ello la caracterización de los usuarios del transporte público.

Para obtener los datos necesarios con los que poder trabajar es fundamental realizar una encuesta perfectamente diseñada, siguiendo distintas metodologías expuestas en los apartados previos.

En la aplicación práctica que se ha llevado a cabo en el transporte público de Santander, tanto la encuesta de Preferencias Reveladas como la Encuesta de Preferencias Declaradas están formadas por dos partes perfectamente diferenciadas:

1. Una primera parte común para los dos tipos de encuesta: La caracterización de los usuarios y no usuarios del transporte público (socio-económica) y del viaje desarrollado por ellos. En esta primera parte de la encuesta se incluye la pregunta sobre Valoración Inicial Global del Servicio ofertado por el Transportes Urbanos de Santander, TUS (valor de 1 a 5) (ver figura 19)
2. Una segunda parte distinta para cada una de las dos tipologías de encuestas definidas (PR y PD).
   - 2.1. En la encuesta de PR: Valoración de cada una de las variables (de 1 a 5) implicadas en el estudio de la calidad percibida por los usuarios del transporte público colectivo. En esta segunda parte de la encuesta se incluye la pregunta sobre Valoración Final Global del Servicio ofertado por el TUS.
   - 2.2. En la encuesta de PD: Elección de la mejor alternativa para cada uno de los escenarios planteados. En total se plantearon a cada encuestado 8 escenarios no etiquetados, teniendo cada uno de ellos 2 alternativas de elección. Esta encuesta se ha realizado tanto a los usuarios como a los no usuarios del transporte público.

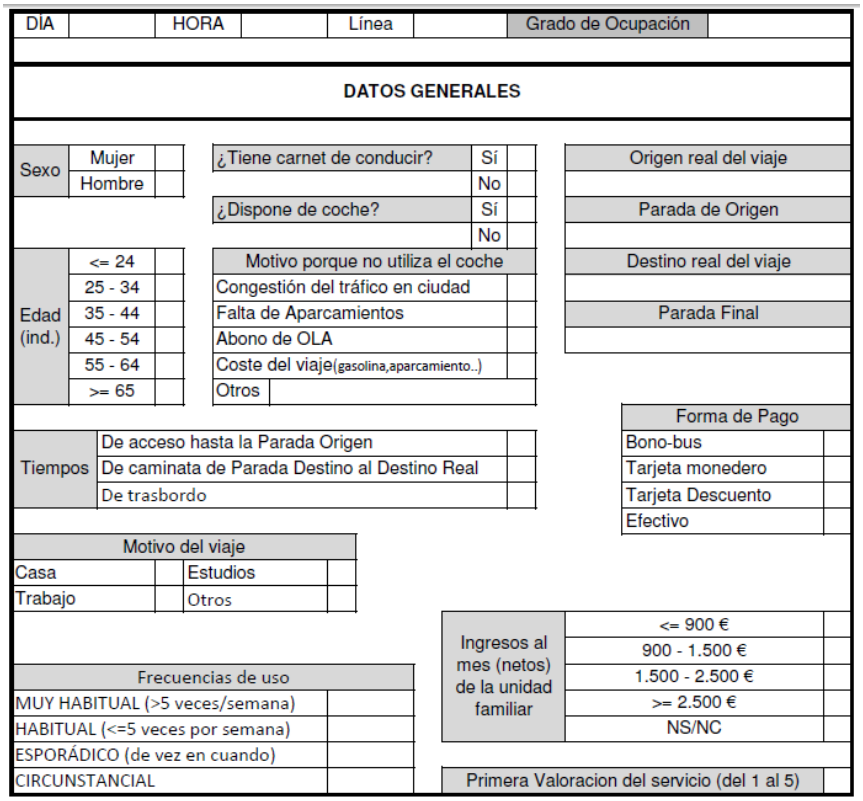
La parte correspondiente a la segunda parte de la encuesta, tanto de PR como de PD se presentará en detalle en los sub-apartados siguientes.

Aunque la explotación de los datos se ha realizado tanto para el global del sistema

como para cada una de las líneas, en esta investigación se presentarán los resultados obtenidos para el global del sistema y para las 4 líneas especificadas previamente: las dos con mayor volumen de pasajeros (L1 y L5C1) y las dos con mejor volumen de pasajeros (L11 y L14).

A continuación se muestra la explotación de todos los datos, pudiendo obtener ya las primeras conclusiones sobre la caracterización socio-económica de los usuarios del bus, tanto del global del sistema como de cada una de las líneas por separado.

Además, se presentará también la caracterización de los no usuarios del transporte público. Los no usuarios del transporte público forman el conjunto de los potenciales usuarios. A la hora de fomentar el cambio modal hacia el transporte público, persiguiendo una movilidad más sostenible, es importante conocer lo que los potenciales usuarios esperarían de un servicio eficiente, es decir, la calidad deseada por ellos. Una vez que se conoce lo que esperan los potenciales usuarios, se podría plantear políticas encaminadas a la captación de los potenciales usuarios del transporte público.



DÍA		HORA		Línea		Grado de Ocupación	

DATOS GENERALES

Sexo	
Mujer	
Hombre	

Edad (ind.)	
<= 24	
25 - 34	
35 - 44	
45 - 54	
55 - 64	
>= 65	

¿Tiene carnet de conducir?	
Sí	
No	

¿Dispone de coche?	
Sí	
No	

Motivo porque no utiliza el coche	
Congestión del tráfico en ciudad	
Falta de Aparcamientos	
Abono de OLA	
Coste del viaje(gasolina,aparcamiento..)	
Otros	

Tiempos	
De acceso hasta la Parada Origen	
De caminata de Parada Destino al Destino Real	
De trasbordo	

Motivo del viaje			
Casa		Estudios	
Trabajo		Otros	

Frecuencias de uso	
MUY HABITUAL (>5 veces/semana)	
HABITUAL (<=5 veces por semana)	
ESPORÁDICO (de vez en cuando)	
CIRCUNSTANCIAL	

Origen real del viaje
Parada de Origen
Destino real del viaje
Parada Final

Forma de Pago	
Bono-bus	
Tarjeta monedero	
Tarjeta Descuento	
Efectivo	

Ingresos al mes (netos) de la unidad familiar	
<= 900 €	
900 - 1.500 €	
1.500 - 2.500 €	
>= 2.500 €	
NS/NC	

Primera Valoracion del servicio (del 1 al 5)	

Figura 4: Caracterización del Usuario de la encuesta de Preferencias Reveladas.

6.2.1. Caracterización de los usuarios del transporte público.

A continuación se presenta el estudio realizado sobre los datos obtenidos con la encuesta de caracterización de los usuarios del transporte público de Santander.

Para la presentación de resultados de esta encuesta se va a trabajar exclusivamente con las 4 líneas presentadas previamente (L1, L5C1, L11 y L14) así como con el global del sistema.

- Caracterización en función del sexo:

Como puede verse en la figura 20, hay el triple de mujeres que de hombres, mínimo, viajando en cada una de las líneas. Este dato lo corrobora el reparto en el global de líneas, donde aparece el mismo resultado. En el caso de la línea 5C1 este hecho es incluso más marcado: llega a haber 4 mujeres por cada hombre. Está claro, por lo tanto, que en Santander, el transporte público es demandado más por mujeres que por hombres, dato a tener en cuenta a la hora de plantear políticas enfocadas a satisfacer al cliente.

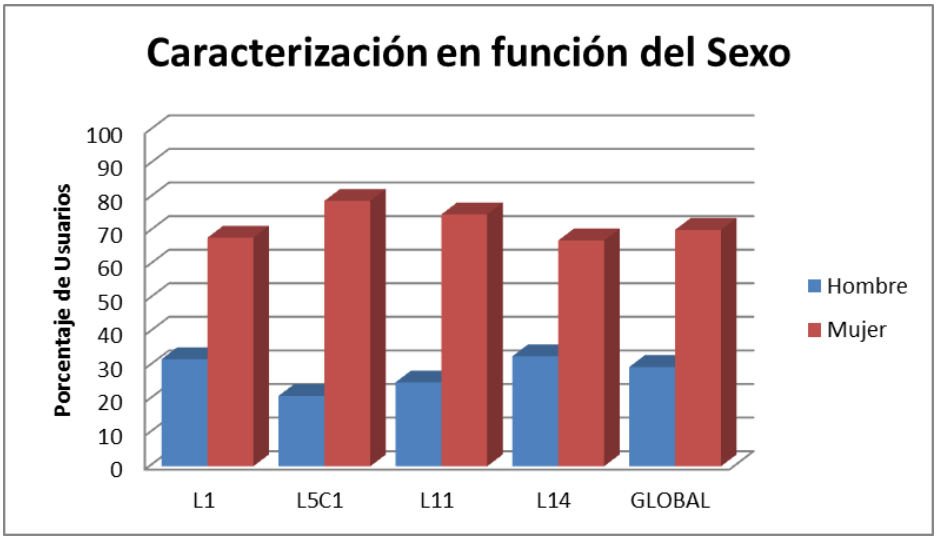


Figura 5: Caracterización, en función del SEXO, de cada una de las líneas y del global de líneas.

- Caracterización en función de la edad:

Las dos líneas con mayor volumen de pasajeros presentan el mayor porcentaje asociado a los más jóvenes. Este hecho es más destacado en la línea L1, donde además se puede ver cómo, a medida que aumenta la edad, disminuye el porcentaje de pasajeros. Sin embargo, en la línea 11 los menores de 34 años son el conjunto con menos representación en esta línea, bastante más pequeño que el resto de rangos de edades.

Al comprobar la edad media del sistema global se comprueba cómo casi el 30% de los usuarios del TUS son menores de 24 años. El resto del mercado se reparte de forma muy homogénea entre los rangos que van de los 25 a los 55 años, que están muy próximos al 20% en cada caso, y los rangos que agrupan a los mayores de 55 años, que rondan el 8% en ambos casos. Es decir, el TUS es un servicio utilizado, principalmente, por los rangos de edad más jóvenes, hecho que debe ser tenido en cuenta en el momento de plantear políticas enfocadas a la mejora de la satisfacción del usuario.

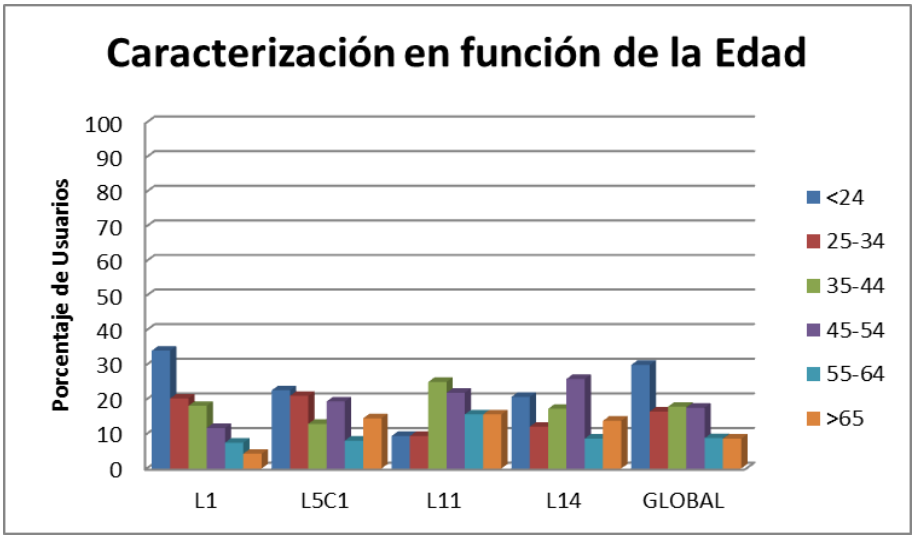


Figura 6: Caracterización, en función de la EDAD, de cada una de las líneas y del global de líneas

- Caracterización en función de la posesión de carné de conducir:

El hecho de que los usuarios posean o no carné de conducir no influye especialmente a la hora de elegir este modo de transporte a la hora de realizar sus viajes cotidianos.

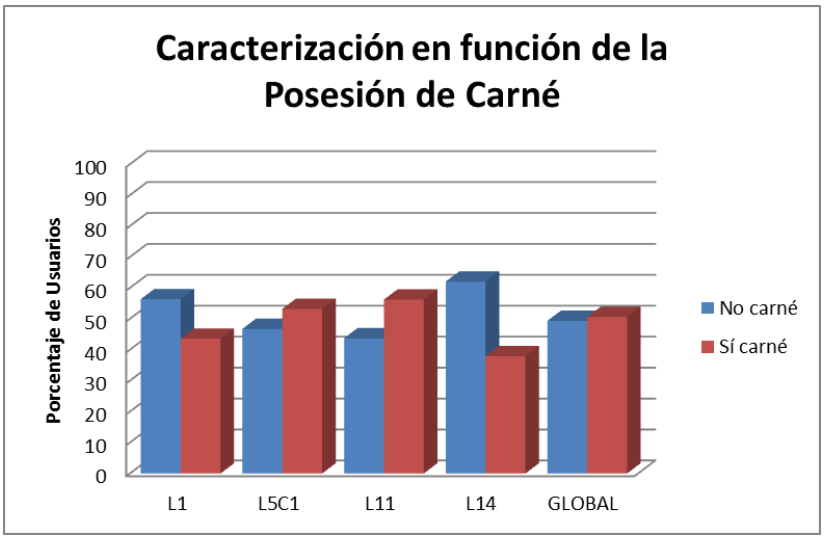


Figura 22: Caracterización, en función de la posesión de CARNÉ, de cada una de las líneas y del global de líneas

- Caracterización en función de la posesión de coche:

Sin embargo, el hecho de poseer coche sí que influye a la hora de elegir el bus como modo de transporte. De hecho, prácticamente el 65% de los usuarios del TUS son cautivos de este modo de transporte, lo que demuestra que el bus, en Santander, no es percibido por los usuarios como una alternativa competitiva con el vehículo privado. Por lo tanto, a la hora de mejorar el servicio ofertado por el TUS se deberán proponer medidas que garanticen o fomenten la competitividad de este modo de transporte público frente al vehículo privado.

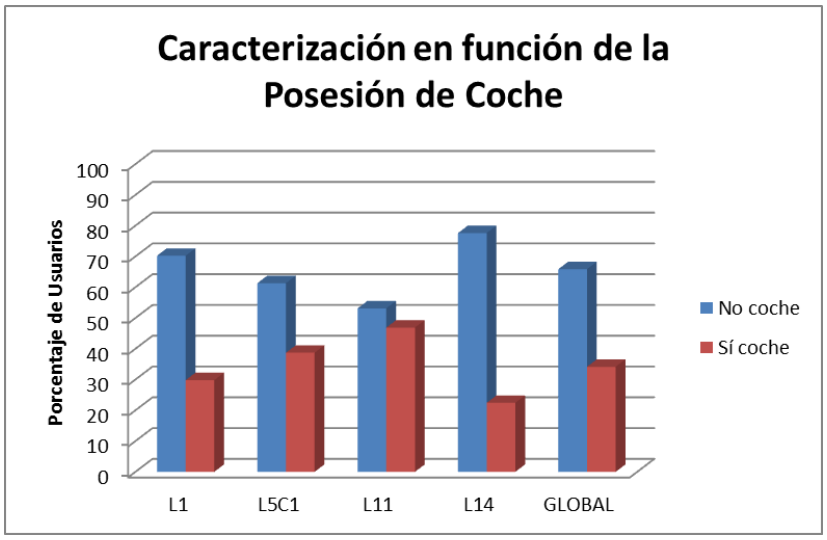


Figura 23: Caracterización, en función de la posesión de COCHE, de cada una de las líneas y del global de líneas

- Caracterización en función del nivel de ingresos:

Antes de comentar los datos obtenidos del nivel de ingresos familiares hay que anotar que esta variable debe ser tratada con prudencia, ya que la mayoría de las personas se mostraron reacias a contestar a esta pregunta.

Tras explicar la importancia de este dato para el estudio hubo encuestados que estuvieron más dispuestos a facilitarlo, sin embargo, el 55% de los usuarios del TUS prefirieron no contestar a esta pregunta.

Si se centra el estudio en el porcentaje de personas que sí estuvieron dispuestas a facilitar este dato, las líneas donde el porcentaje asociado al rango >2.500 €/mes es superior al resto, presentan también los porcentajes más elevados de usuarios que contestaron "NS/NC". Sin embargo, la línea donde menor es el nivel de ingresos (L5C1, donde el rango de <900€/es muy superior al resto) es el único caso en el que el porcentaje de usuarios que se negaron a facilitar este dato es menor del 20%. Por lo tanto, a la vista de los resultados obtenidos, a medida que aumenta el nivel de ingresos las personas son más reacias a facilitar el nivel de ingresos al que pertenecen.

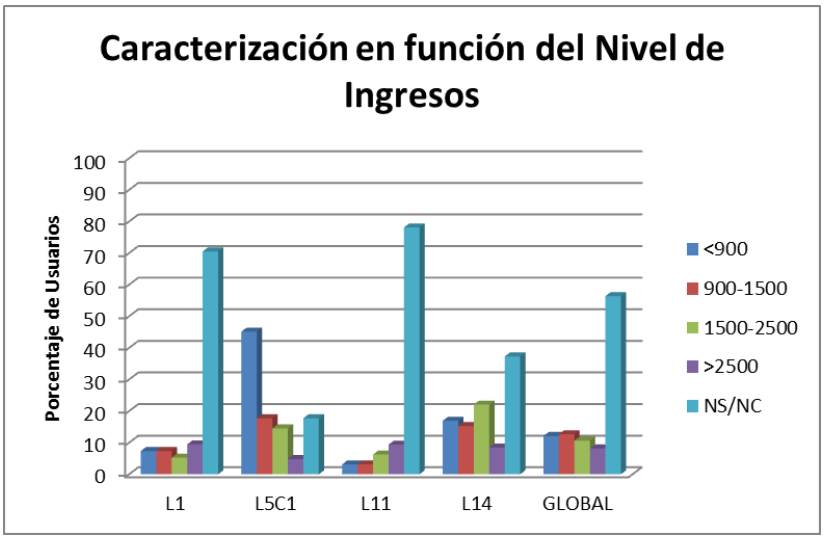


Figura 24: Caracterización, en función del nivel de INGRESOS, de cada una de las líneas y del global de líneas.

- Caracterización en función del motivo de viaje:

En función del motivo de viaje, los dos más importantes son ir/volver a casa e ir a

trabajar. Hay que tener en cuenta que la encuesta se ha realizado entorno a la hora punta del transporte público de Santander (13:30), entre las 12:30 y las 14:30. En esos horarios la mayoría de los viajes que realizan los escolares son para volver a casa:

Este horario comprende la salida de los estudiantes de los colegios e institutos y de las universidades (en las carreras con horarios matutinos).

Por lo tanto, la mayoría de los estudiantes están de retorno a sus casas. Hay estudiantes que tienen horario de tarde y son los que recoge la encuesta.

Se puede comprobar cómo los viajes con motivo trabajo y motivo casa son muy semejantes. En las 2 líneas con mayor volumen de pasajeros el número de viajes por trabajo es mayor que el número de viajes por.ir/volver a casa. Ocurre lo mismo con el sistema global del servicio. Sin embargo, para las líneas con menor volumen de pasajeros el número de viajes por ir/volver a casa es mayor que por ir a trabajar.

Es fundamental tener en cuenta que los viajes realizados por motivo trabajo y por motivo estudios son viajes cotidianos, sujetos a unos horarios muy concretos, por lo que sus necesidades a la hora de desplazarse con poco flexibles.

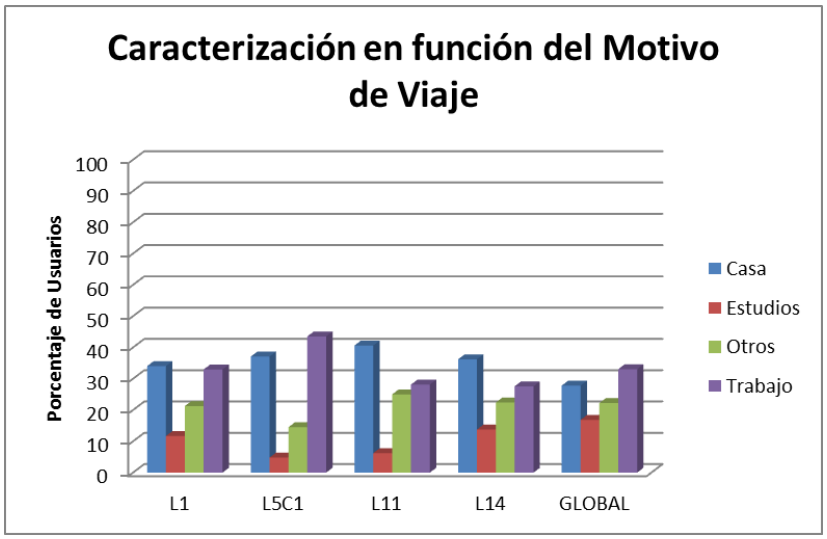


Figura 7: Caracterización, en función de la posesión del MOTIVO de viaje, de cada una de las líneas y del global de líneas

- Caracterización en función de la frecuencia de uso:

Si se estudian los usuarios del transporte público de la ciudad en función de la frecuencia de uso del mismo, la conclusión que se obtiene es que la mayoría de los usuarios

son habituales o muy habituales, es decir, utilizan el transporte público prácticamente a diario. De hecho, salvo en la línea L1, en el resto de líneas estudiadas con más detenimiento (L5C1, L11 y L14) el porcentaje de usuarios que utilizan el bus más de 5 veces por semana es muy superior al del resto de categorías, rondando en todos los casos el 60% de los usuarios encuestados. Este mismo hecho se repite cuando se estudia el sistema como un todo, es decir, el global del sistema.

Por lo tanto, el usuario del transporte público de Santander es un usuario que conocer el servicio ofertado y, por lo tanto, se entiende que hace un uso más eficiente del mismo y que es capaz de realizar una valoración real (desde su percepción) de cada una de las variables que se le plantean en la encuesta de calidad.

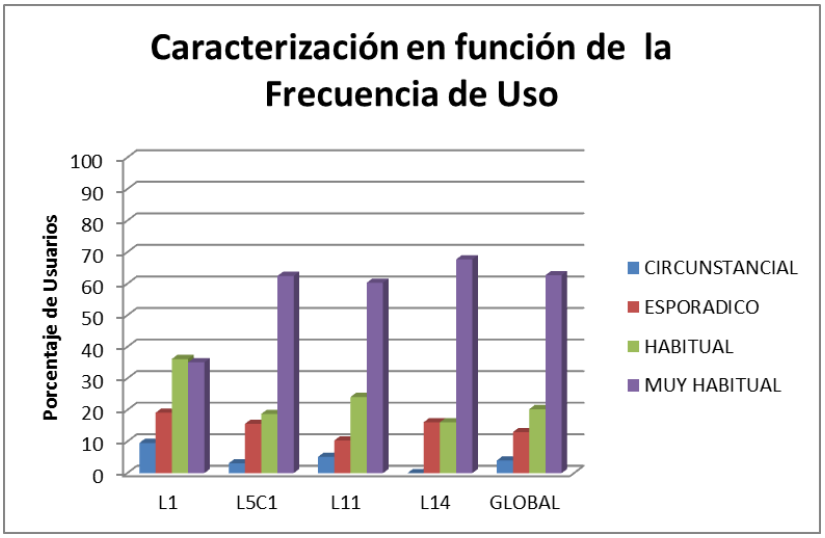


Figura 8: Caracterización, en función de la FRECUENCIA de uso del bus, de cada una de las líneas y del global de líneas

- Caracterización en función del motivo por el que no usa el coche:

El principal motivo por el que los usuarios del transporte público utilizan este modo de transporte y no el coche es porque son cautivos, es decir, no poseen coche. El siguiente motivo por el cual los usuarios eligen el bus sobre el coche es la falta de aparcamiento en su destino. En general los costes asociados a viajar en coche (coste de viajar como tal y el pago por aparcar (OLA)) no son tenidos muy en cuenta a la hora de preferir el bus al coche, de hecho son los motivos que menos representación han tenido en la encuesta de caracterización. A los usuarios del transporte público les afecta más la incomodidad de

aparcar, que el hecho de pagar por usar el vehículo privado.

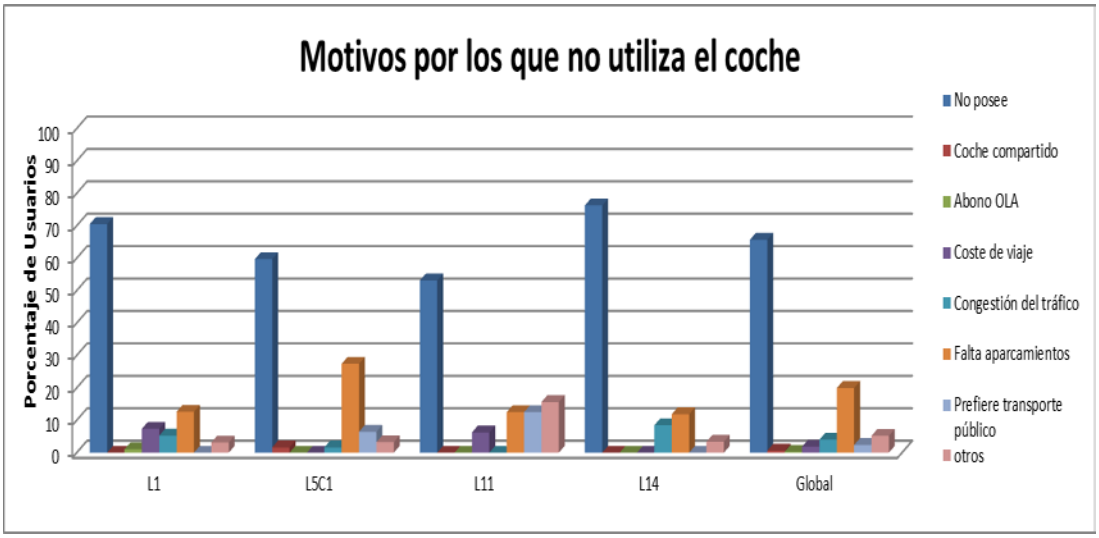


Figura 9: Caracterización, en función del MOTIVO por el que NO USA COCHE, de cada una de las líneas y del global de líneas

6.2.2. Caracterización de los potenciales usuarios del transporte público.

A continuación se presenta el estudio realizado sobre los datos obtenidos con la encuesta de caracterización de los potenciales usuarios del transporte público de Santander.

Como ya se ha mencionado previamente, es igualmente importante conocer lo que los potenciales usuarios esperan del transporte público de la ciudad. El hecho de que se cumplan sus expectativas puede ayudar a fomentar el cambio modal, sobre todo si se consigue que la calidad del transporte público haga de este un modo de transporte realmente competitivo frente al vehículo privado.

La encuesta de caracterización de los potenciales usuarios del transporte público es prácticamente igual que la encuesta de caracterización diseñada para las personas que sí utilizan el bus. La única diferencia es la pregunta en la que se hace referencia a los motivos por los cuales no usa el bus (para la encuesta de caracterización de los usuarios esa pregunta está encaminada a los motivos por los que no usa el coche en su desplazamiento).

A los potenciales usuarios se les ha realizado la encuesta en la calle, en el momento de aparcar su vehículo privado o en el momento que iban desplazándose a pie (los dos modos de transporte más significativos de la ciudad, como ya se ha mencionado

previamente) o en cualquier otro modo de transporte distinto al bus. Una vez que se ha captado su atención se les pregunta si actualmente son usuarios del bus, si la respuesta es negativa se les continua haciendo la encueta. Si la respuesta es positiva (independientemente de la frecuencia de uso) se les agradece su participación pero no se continúa con la encuesta.

Se ha utilizado la misma franja horaria que para las encuestas a los usuarios en el transporte público, es decir, de 12:30 a 14:30.

- Caracterización en función del sexo:

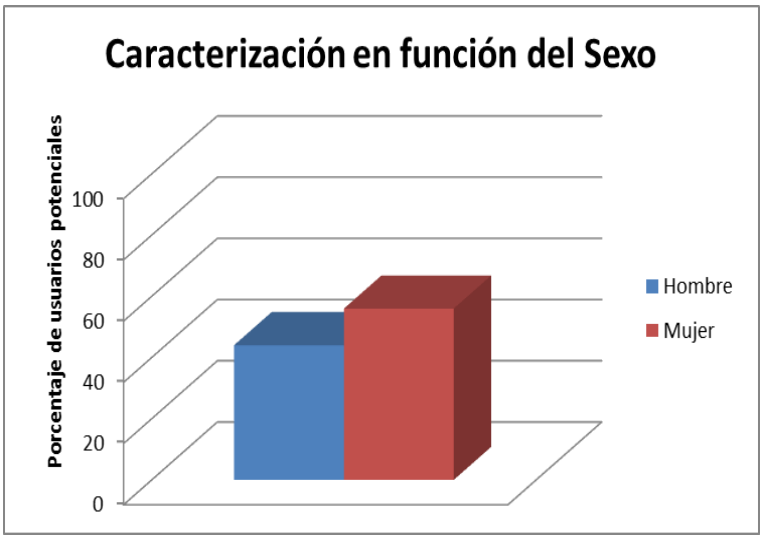


Figura 10: Caracterización de los potenciales usuarios en función del SEXO.

Casi el 65% de los potenciales usuarios del transporte público de Santander son mujeres. Por lo tanto, a la hora de diseñar futuras políticas encaminadas hacia el fomento del bus como modo de transporte habitual tendrán que tener en cuenta las necesidades ligadas a las mujeres.

- Caracterización en función de la edad:

El rango de edad predominante de los potenciales usuarios es el que engloba a los menores de 24 años. No se debe perder de vista el rango horario en que se realizó la encuesta. Entre las 12:30 h. y las 14:30 horas toda la población estudiantil se desplaza bien al centro de estudio, bien de vuelta a casa. A esta población estudiantil hay que sumarle los viajes realizados por este conjunto de potenciales usuarios (< de 24 años) por cualquier otro motivo.

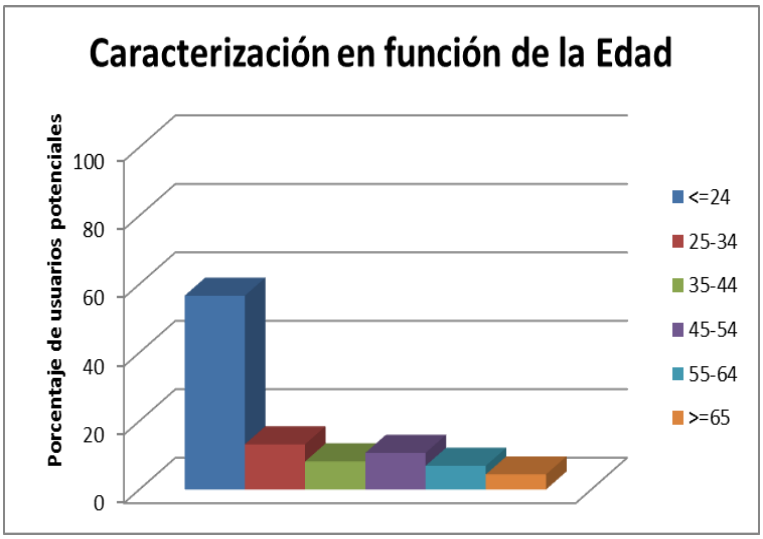


Figura 11: Caracterización de los potenciales usuarios en función de la EDAD.

- Caracterización en función de la posesión de carné:

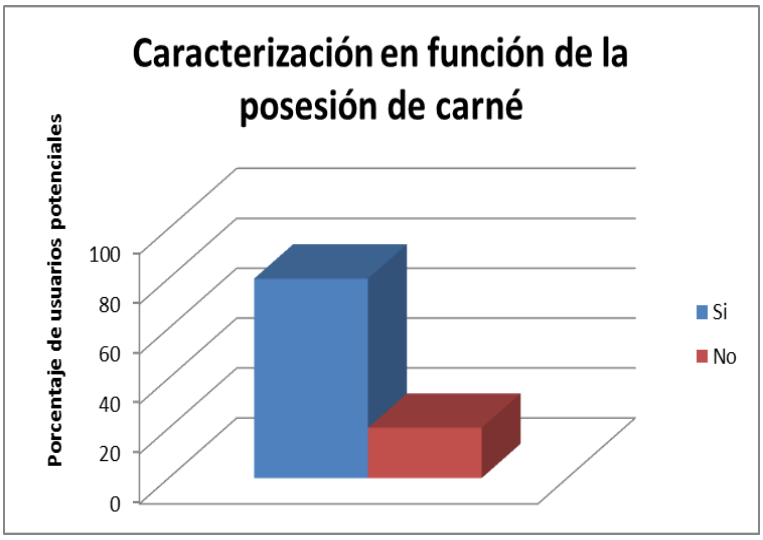


Figura 30: Caracterización de los potenciales usuarios en función de la posesión de CARNÉ.

Un porcentaje algo superior al 80% los potenciales usuarios tienen carné de conducir. Es decir, hay un 20% que no tiene posibilidad de desplazarse de forma independiente en el vehículo privado motorizado.

- Caracterización en función de la posesión de coche

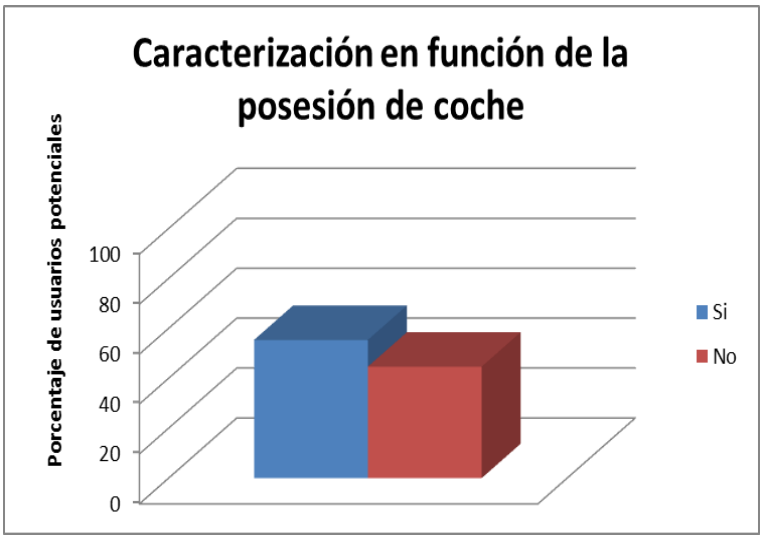


Figura 31: Caracterización de los potenciales usuarios en función de la posesión de COCHE.

El 55% de los encuestados tienen un vehículo privado a su disposición. Es decir, 1 de cada 2 encuestados tiene su propio modo de transporte motorizado para desplazarse por la ciudad.

- Caracterización en función del nivel de ingresos:

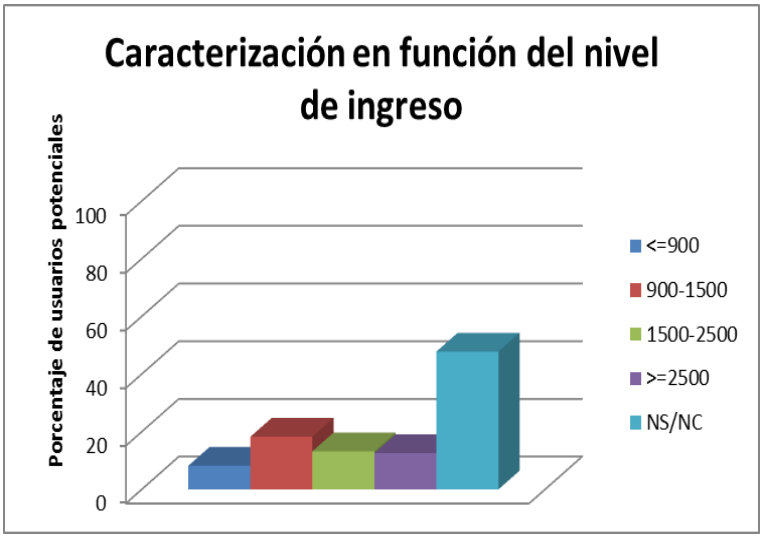


Figura 32: Caracterización de los potenciales usuarios en función del nivel de INGRESOS.

Como ocurre con los usuarios de bus, la respuesta relacionada con el nivel de ingresos de la familia es la más difícil de obtener. De hecho, prácticamente la mitad de los potenciales usuarios del transporte público (el 47% de los encuestados) no han querido contestar a esta pregunta. Es, por lo tanto, un dado que debe ser tratado con cierta precaución a la hora de explotarle.

Las personas que han contestado a esta pregunta se reparten de forma más o menos equilibrada entre los rango establecidos, siendo el que menos personas engloba aquél que hace referencia a un nivel de ingresos bajo (< 900 €/mes).

- Caracterización en función del modo de transporte utilizado:

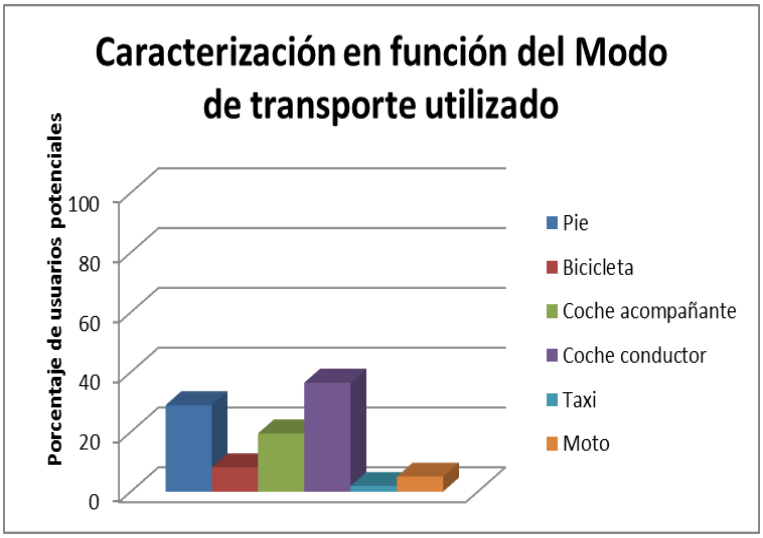


Figura 33: Caracterización de los potenciales usuarios en función del modo de transporte utilizado.

La mitad de los potenciales usuarios se desplazan en vehículo privado, bien como conductor, bien como acompañante. Es decir, el modo de transporte por excelencia de los potenciales usuarios del transporte público es el coche. Este dato es de gran utilidad ya que permite conocer qué modo de transporte es aquel contra el que compite el bus en desventaja. Se tendrían que plantear políticas que favorezcan el transporte público y que consigan, a su vez, que el vehículo privado no sea tan eficiente y competitivo frente al bus.

Prácticamente el 30% de los encuestados se desplazan a pie, es decir, no utilizan ningún modo de transporte motorizado a la hora de moverse por la ciudad. Este colectivo solamente puede ser captado si se mejora el transporte público de tal forma que le merezca la pena pagar por desplazarse.

- Caracterización en función del motivo del viaje.

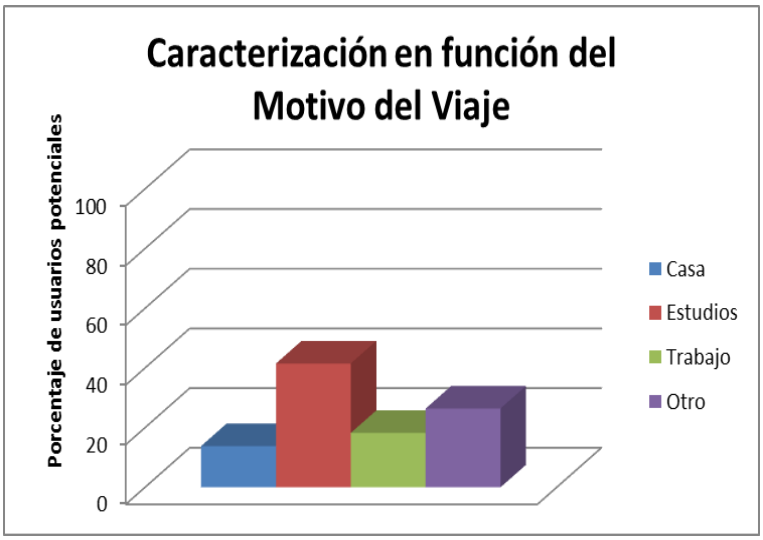


Figura 34: Caracterización de los potenciales usuarios en función del MOTIVO de viaje.

Casi la mitad de los encuestados (41%) tienen como motivo de viaje los estudios. El 18% lo hace para ir a trabajar, mientras que un 14% se desplaza hacia o desde su casa. Un porcentaje importante, un 20%, se desplazan entre las 12:30 h. y las 14:30 h. por la ciudad por diferentes motivos a los planteados.

Es decir, entre los viajes que se hacen para ir al centro de estudio y los viajes que se realizan para ir al trabajo se ocupan prácticamente el 60% de los viajes realizados en hora punta por los no usuarios. Estos viajes están sujetos a unos horarios muy concretos, que los potenciales usuarios deben cumplir diariamente. El hándicap de depender diariamente de un modo de transporte público (horarios, frecuencias, paradas, etc.) debe ser compensado con la comodidad, la eficiencia, la rapidez, etc. para compensar la libertad de moverse de forma independiente (y no colectiva con el transporte público. Es decir, se debe presentar un transporte público a los potenciales usuarios con cumplan con la calidad deseada por ellos, es decir, un transporte eficiente.

- Caracterización en función de la frecuencia de viaje

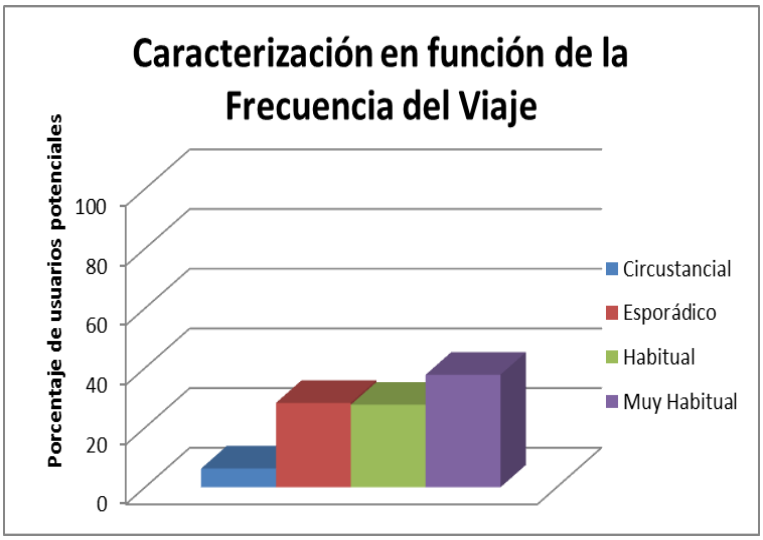


Figura 12: Caracterización de los potenciales usuarios en función de la FRECUENCIA de viaje.

El 38% de los encuestados realizan el viaje (aquel que están realizando cuando se les hace la encuesta) de forma muy habitual, es decir, más de 5 veces por semana. El reparto entre los desplazamientos habituales y los esporádicos es prácticamente el mismo. Entre los viajes habituales y los viajes muy habituales ocupan el 66% de los viajes realizados por los potenciales usuarios encuestados. El hecho de convencer a una parte de estos potenciales usuarios (habituales y muy habituales) de que realicen sus viajes cotidianos en bus sería un logro muy beneficioso para toda la sociedad. Para ello se debe presentar un transporte público eficiente y competitivo frente al vehículo privado motorizado.

- Caracterización en función del motivo por el que no usa el bus:

El hecho de tener que pagar por utilizar el bus no es un problema para la mayoría de los potenciales usuarios, sólo un 7% lo utiliza como motivo para no utilizar el bus. Sin embargo, los tiempos de espera, los tiempos de viaje y el recorrido de las líneas (sujetos a unos trazados totalmente estáticos) son valorados de forma equitativa como motivo para no utilizar el bus. Es fundamental, por lo tanto, garantizar un servicio eficiente, con tiempo de espera reducidos (y asumibles por los usuarios del sistema), tiempos de viaje más cortos y líneas de bus más directas entre los centros principales de atracción y generación de viaje. Todo ello conseguiría alcanzar un transporte público con la calidad deseada por parte de los potenciales usuarios.

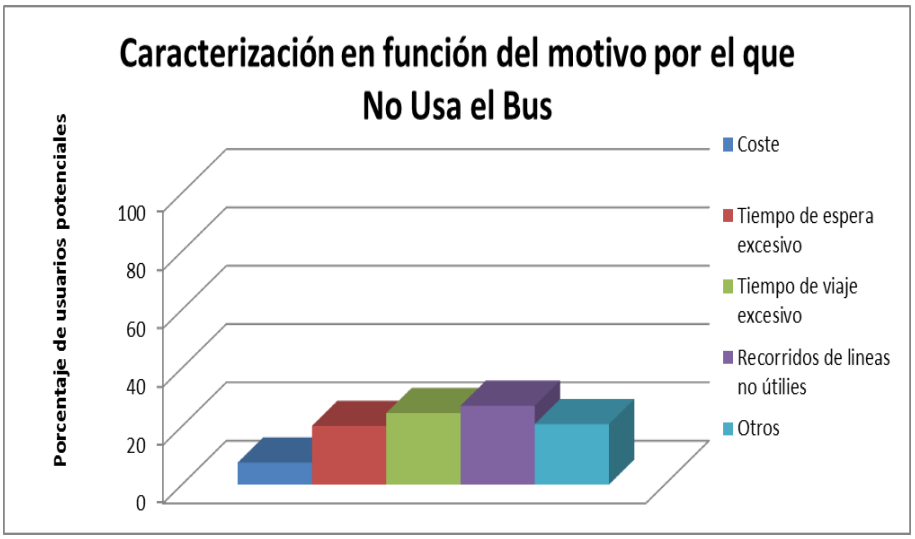


Figura 13: Caracterización de los potenciales usuarios en función del motivo por el que NO USA EL BUS.

7. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

7.1. Filosofía de la propuesta

Para el desarrollo del proyecto se diseñaron 4 situaciones o escenarios, en los que en cada uno se introducía un cambio con respecto al anterior.

7.1.1. Situación 1

En el primer escenario, se ideó una nueva línea, el **corredor Hospital de Valdecilla-Universidad de Cantabria**, por razones de operatividad y por el hecho de que un poco antes de Valdecilla se encuentra una zona en la calle Cajo (figura 37), donde ahora se encuentran las cocheras del TUS y el antiguo parque de bomberos, y poco después de la Universidad se encuentra el parking del estadio de El Sardinero (figura 38). En ambas cabeceras se ha decidido realizar dos parkings disuasorios, el del Sardinero ya está construido y el otro no.

Figura 37: Cabecera de El Cajo

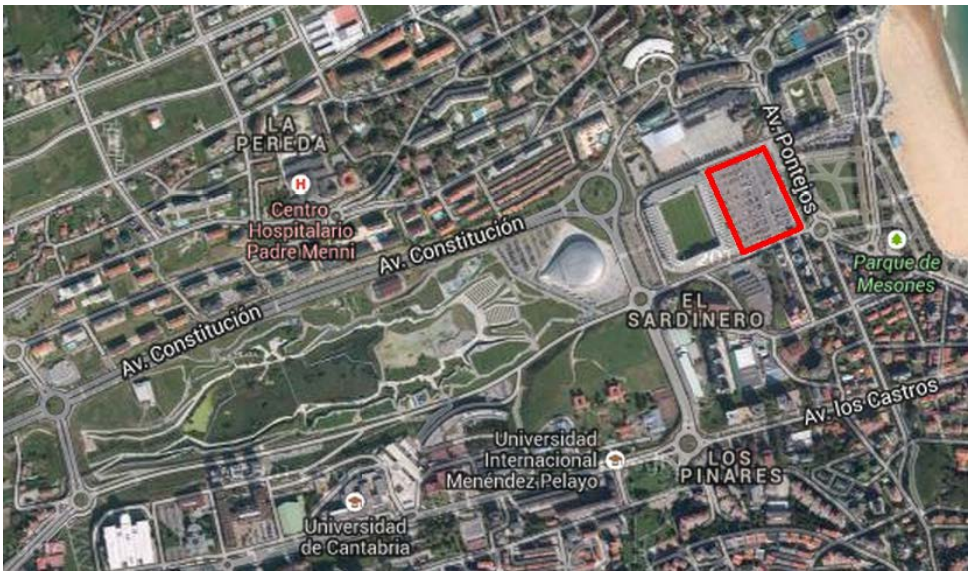


Figura 38: Cabecera de El Sardinero

De esta manera, el corredor queda tal y como se muestra en la figura 39 con dos cabeceras una en el Cajo y otra en el Sardinero, y pasando por los túneles de Tetuán, de la Calle Burgos y por el paso inferior de la glorieta de Cuatro Caminos. Todas las calles y pasos inferiores por los que discurre el nuevo corredor forman parte de las calles principales de Santander. Al tratarse de las principales arterias de la ciudad y debido al alto nivel de congestión que tienen, hemos considerado que puede ser de gran interés para la ciudad el diseño de un corredor BRT con las características que estos tienen y que se han detallado en el apartado 4 de este proyecto.

Figura 39: Corredor definitivo.

Además, se reestructuraron todas las líneas del TUS, excepto las líneas 5C1 y 5C2, que quedaron tal cual estaban. Quedando las líneas tal y como se muestra en la figura 40.

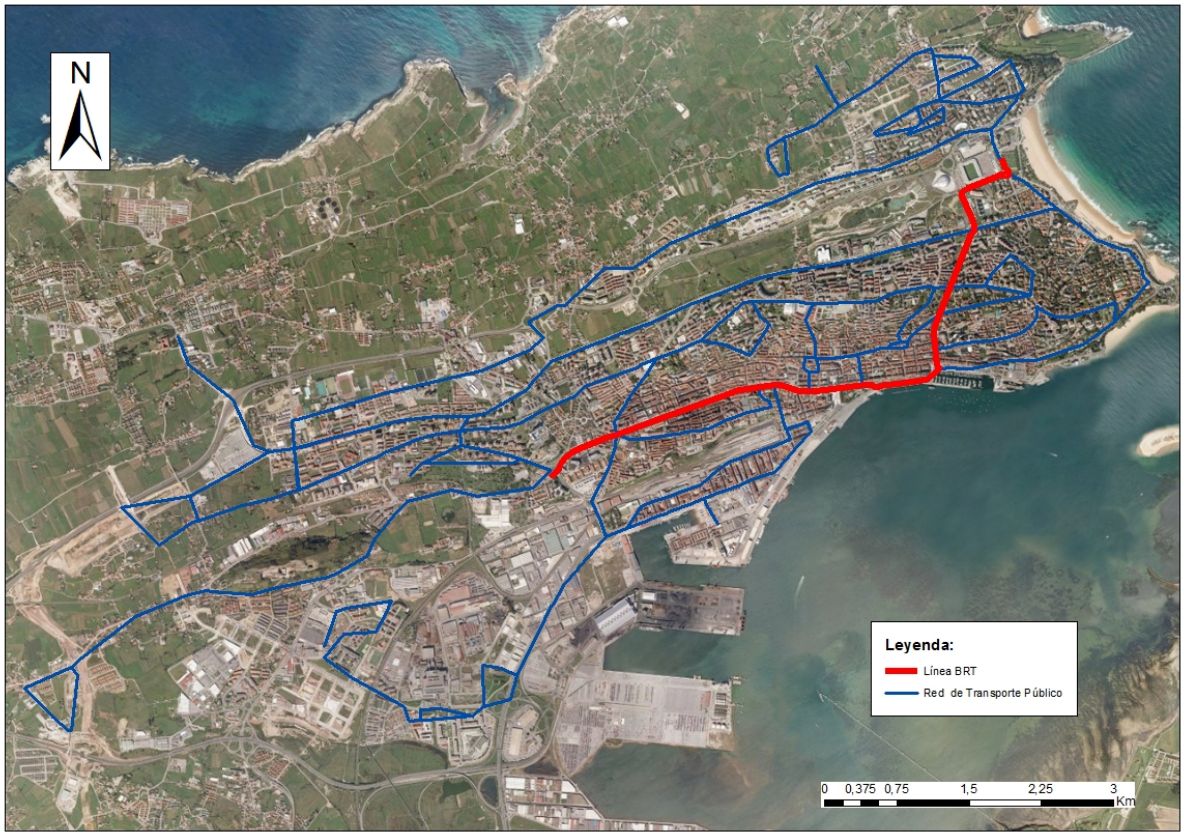


Figura 40: Plano de las líneas de autobús definitivas de Santander.

Para esta situación no se implementó ninguna medida para aumentar la velocidad comercial del autobús, salvo adaptar el tamaño de las paradas al de los nuevos autobuses articulados, que serán empleados para la operación de la nueva línea del TUS.

7.1.2. Situación 2

En la situación 2, se introdujo una gran modificación, el carril bus. Se propuso la creación de un carril bus a lo largo de todo el corredor, con excepción de los pasos inferiores, ya que solo disponen de un carril por sentido y en la calle Casimiro Sainz ya que por problemas operacionales resulto que no era viable.

La eliminación de un carril para el uso exclusivo del autobús en la calle Casimiro Sainz podía originar grandes atascos en la rotonda de Puerto Chico. Estos atascos se podrían extender por el Paseo Pereda y por la calle Casimiro Sainz hasta llegar al túnel de Tetuán. Por esta razón se decidió no quitar un carril para el uso exclusivo del autobús.

La disposición final del carril bus esta detallada en el apartado 7.4.1. del presente

proyecto. Con las secciones de las principales calles y detallando las zonas en las que hay carril bus y en las zonas que no lo hay por motivos operacionales (giros, incorporaciones, etc.).

7.1.3. Situación 3

En esta situación, se aumentó la frecuencia de algunas líneas alimentadoras, para así dar un mejor servicio a las zonas periféricas. Como era de esperar este aumento de las frecuencias, originó un gran aumento en el número de viajeros del TUS (60%). Este aumento de usuarios originó a su vez un incremento de los ingresos, lo que permitió bajar los intervalos en todas las líneas, tal y como se muestra en la figura 69 del apartado 7.5.

7.1.4. Situación 4

En la situación 4 y definitiva, se propuso implantar la priorización semafórica en el Paseo Pereda. Desde la rotonda de Puerto Chico hasta la rotonda de los Jardines de Pereda, tal y como se muestra más detalladamente en el punto 7.3.3. Además, como los ingresos por pasajeros eran muy amplios y había grandes beneficios (cosa nada común en el transporte público, ya que lo más normal es que haya pérdidas), tal y como aparece en la figura 71; se decidió mejorar las frecuencias del resto de las líneas (figura 70).

7.2. Modelización del proyecto

En este proyecto se ha realizado un análisis multi enfoque, uno estratégico y otro operacional. El primer enfoque es el estratégico, para el cual se realiza un modelo de macro simulación de la ciudad de Santander, en el que se introducen todos los escenarios con sus características (cambio de las líneas del TUS, construcción del carril bus, etc.) y se efectúa un reparto modal para cada situación. Con los datos del reparto modal se calcula la demanda del corredor.

De la modelización a nivel macro (o enfoque estratégico) se calculan, además de la demanda del corredor, los tiempos en parada (por el sube-baja de pasajeros en cada parada), etc.

Con estos datos y con la demanda del corredor se procede a calibrar el modelo de microsimulación. En este modelo se realiza un enfoque operacional, en el que se han simulado todas las situaciones. De estas simulaciones se han sacado datos de tiempos de viaje, flota de autobuses necesaria, costes, etc.

7.2.1. Calibración y validación del Modelo Macroscópico de Santander.

Tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior, el primer paso a realizar será la calibración y validación de la situación actual.

Para ello se han tomado las funciones flujo-demora (del tipo BPR) de los arcos de la red vial según su tipología de Ibeas et al. (2007). Se han analizado aquellos arcos de la red principal en los que están permitidos los estacionamientos en superficie (figura 40) aplicando la reducción de capacidad correspondiente y las nuevas curvas flujo-demora siguiendo la metodología descrita en la Tarea 9.

Con todas las nuevas funciones de demora en arcos, elementos de control y paradas, se aplicará el modelo de partición modal (Ibeas et al., 2007) obteniendo las matrices de Transporte Público y Privado, que serán reasignadas para comprobar que los resultados no han variado significativamente con respecto a las mediciones realizadas de flujo en arco y en líneas.

Se ha asignado la matriz de transporte privado a la red (figura 41) comparando la asignación con los aforos de validación (figura 42), obteniendo un R^2 de 0.87, lo que refleja un buen ajuste.

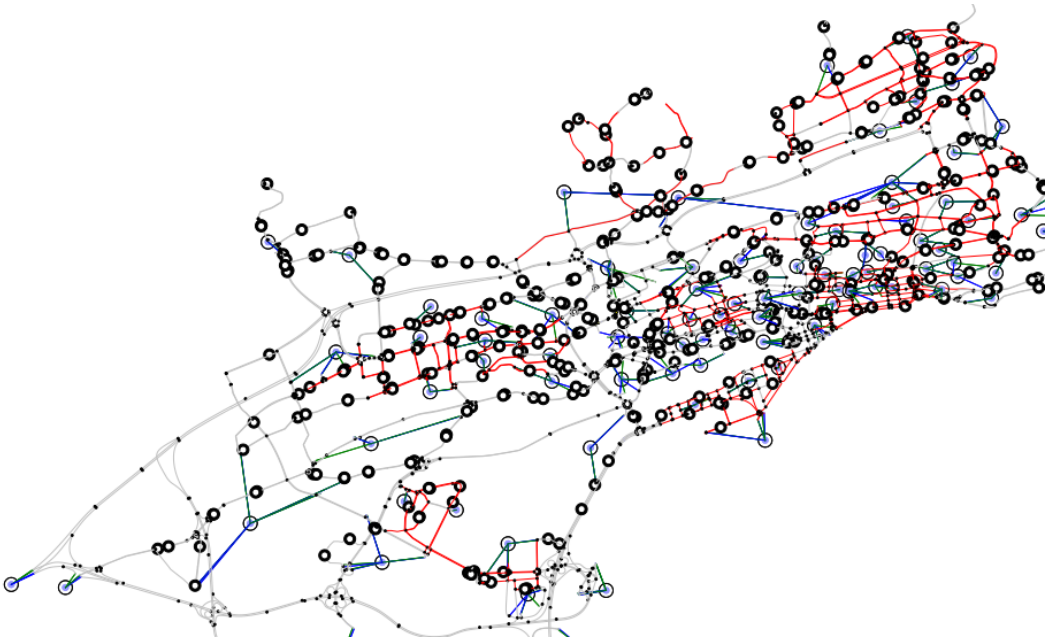


Figura 141. Arcos con estacionamientos

Finalmente, se ha hecho lo propio con la matriz de transporte público, comparando los viajeros asignados a cada línea con los facilitados por TUS, los tiempos de ciclo de cada línea y sus velocidades comerciales.

Viajes (hora punta)		Velocidad comercial (km/h)(incluye pausas en cabecera)	
Real	**Sim.**	**Real**	**Sim.**
4944	4939	11.88	11.92

Tabla 6. Ajuste para el TUS.

Figura 152. Asignación de tráfico privado en Santander.

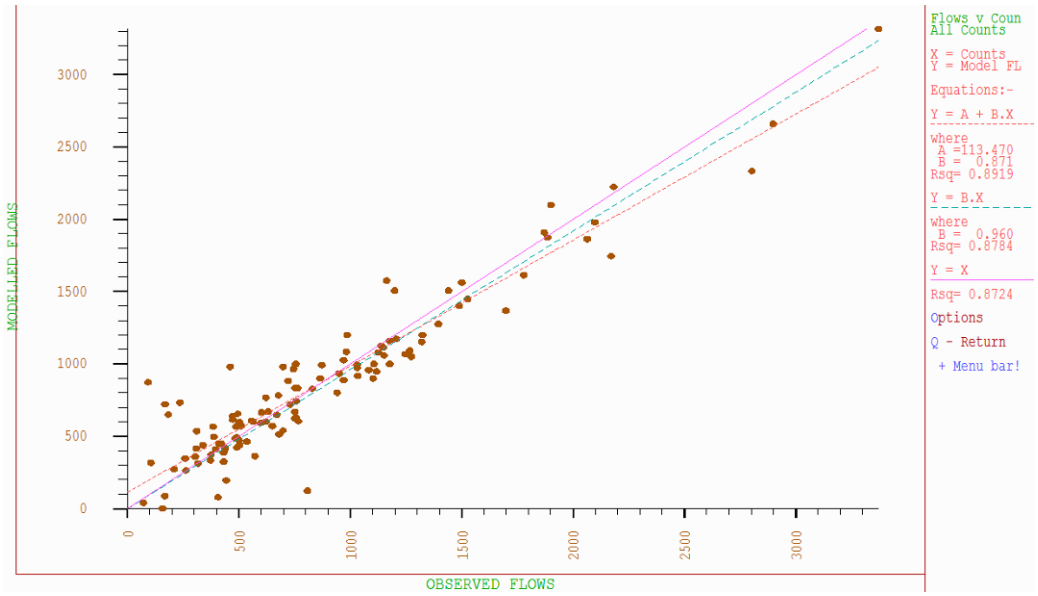


Figura 3. Ajuste entre flujos asignados y medidos.

7.2.2. Modelización a nivel micro

En el desarrollo de cualquier modelo de tráfico, incluyendo un modelo de microsimulación, es que el modelo necesita ser ajustado para un determinado propósito. La calibración es el proceso de modificar y cambiar los valores de los parámetros de un modelo en orden de ajustar los resultados de la simulación a la información observada.

El objetivo de la calibración es mejorar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento del conductor y el rendimiento de determinados indicadores como los tiempos de viajes, demoras y longitudes de colas variando los valores de los parámetros de sus valores por defecto.

Los cinco pasos recomendados para una correcta calibración (Departamento de Transporte de California, 2002) de un modelo de microsimulación de tráfico son los siguientes:

- Representación de la Red.
- Calibración de la Demanda.
- Calibración de la Capacidad
- Rendimiento de la Calibración.
- Validación

7.2.2.1. Representación de la Red.

Se debe chequear (y calibrar), por ejemplo, si todas las intersecciones están consideradas, la velocidad máxima por sección, el número de carriles de cada arco, el uso de los carriles para los movimientos en intersecciones, la ruta de buses y la ubicación de sus respectivas paradas, entre otras características.

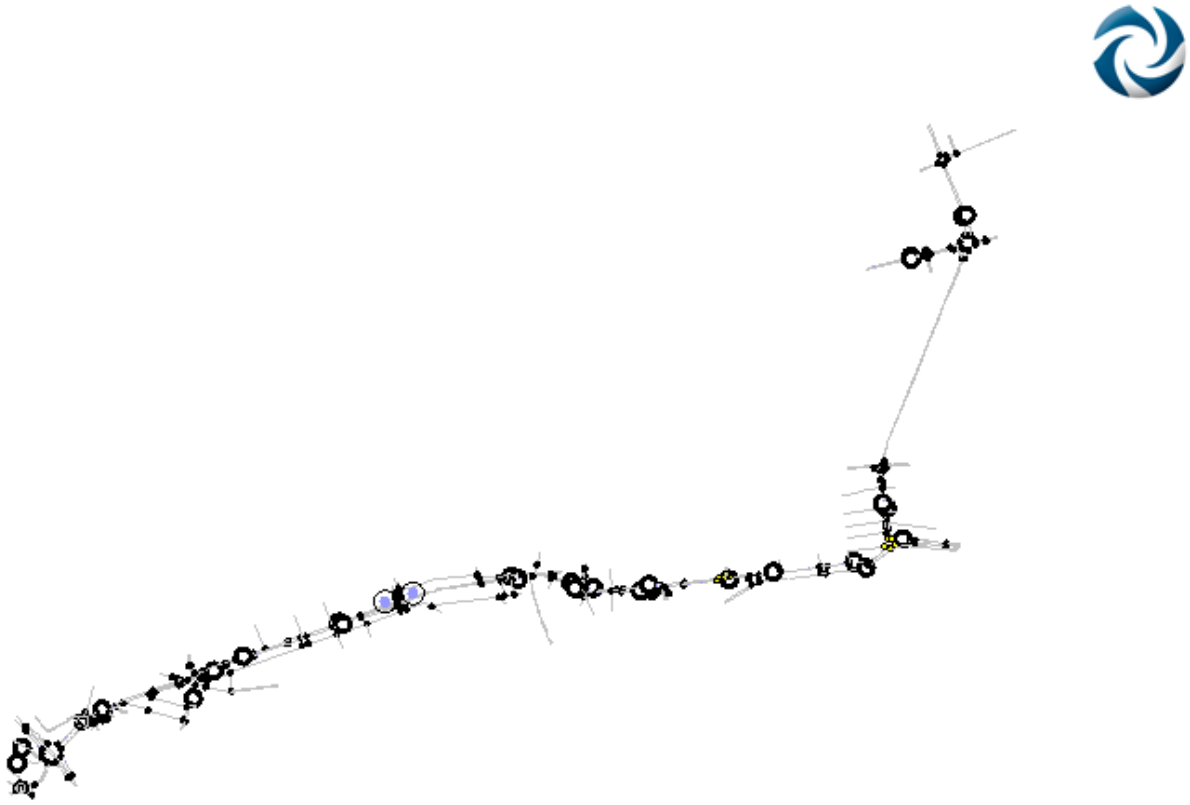


Figura 44: Representación del corredor y de los viales que lo interceptan, en AIMSUN.

7.2.2.2. Calibración de la Demanda.

La información de la demanda en un modelo de microsimulación de tráfico se realiza a través de dos opciones:

- Ingresando demanda por arco, composición vehicular y porcentajes de giro.
- Importando una Matriz Origen – Destino en donde el modelo de microsimulación asigna el tráfico a la red; la matriz OD puede ser especificada por periodos para representar la variación de la demanda.

De acuerdo a diferentes estudios de simulación se sugiere la especificación de la demanda a través de una Matriz OD porque permite por una parte que los vehículos tengan oportunidad de planear un cambio de carril, no hay vehículos circulado por rutas cíclicas al interior de la red y permite la asignación de vehículos como consecuencia de algún incidente (AUSTROADS 2006).

La sintonía fina a nivel de arco incluye ajustes a su geometría y velocidades (o costos). A nivel de red, los parámetros asociados a los modelos de asignación dinámica como por ejemplo, la periodicidad de los cálculos, el porcentaje de vehículos que tienen conocimiento

de los costos de la red, deben ser también calibrados para lograr el mejor ajuste entre los flujos simulados y observados.

7.2.2.3. Calibración de la Capacidad.

En este paso de calibración se ajustan tanto los parámetros globales como específicos de un arco para replicar de la mejor manera posible los valores de capacidad observados o aceptados de valores históricos. Esto es un paso importante porque la capacidad tiene un efecto significante en predecir el rendimiento de indicadores tales como demoras y colas.

Los parámetros significativos que controlan la capacidad son:

- Headway (parámetro global en Paramics)
- Tiempo de reacción del conductor
- Gap critica para cambio de carril
- Mínima separación en condiciones de detención
- Aceptación de gap

7.2.2.4. Rendimiento de Calibración.

Este es el paso final de un proceso de calibración. Para el rendimiento global del modelo de tráfico se utilizan indicadores como tiempo de viaje, demora y/o colas comparando con valores medidos en terreno.

En diferentes estudios de Tesis a nivel nacional (Lacalle, Velasco, Didier, Pavez) el indicador utilizado es la longitud de cola, en donde se utiliza un valor de rendimiento global de acuerdo a la siguiente expresión:

Otros criterios considerados y sus valores históricamente aceptados se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Criterios de Calibración de Modelos.

Criterio y Mediciones (valores modelados versus observados)	Aceptación de Calibración	Comentarios / Fuente
Flujos de Arcos Individuales		FHWA (2004)
dentro de 100 veh/h para flujos < 700 veh/h	> 85% de casos	
dentro de 15% para 700 < flujos < 2700 veh/h dentro de 400 veh/h para flujos > 2700 veh/h	> 85% de casos > 85% de casos	
Suma de todos los flujos por arco	precisión=5%	
Estadístico GEH* < 5 para flujos por arco individual	> 85% de casos	
Estadístico GEH* para suma sobre flujos de arco	< 4	
Tiempo de Viajes para rutas seleccionadas		RTA NSW
Tiempo de Viaje Promedio Relativo a lo observado	Dentro del 10%	
Dentro del 15% de los Tiempos Observados (o 1 minuto si es más grande)	> 85% de casos	
Patrón de Congestión Inspeccionar la dispersión de colas, la distribución de la demanda por pistas, etc	Satisfacción del modelador	Distribución de pistas del tráfico tiene un significativo efecto en la demora de la red
Estabilidad del Modelo		Cinco Corridas usando diferentes valores aleatorios de semillas
Variación entre el mínimo y máximo del flujo que ingresa a la red	Dentro del 5%	
Tabulación de máximos y mínimos de flujos por arco y cordón de acuerdo a variaciones del 20% (o 200 veh/h),10% (o 100 veh/h) y 5% (o 50 veh/h)	Satisfacción del modelador	

Fuente: Departamento de Transporte de California (2002)

El estadístico GEH se define como:

la información observada, independiente del proceso de calibración. Es común que de la información recolectada una porción sea para la calibración y el resto para la validación. Para el rendimiento de la validación comúnmente es utilizado los indicadores de tiempo de viaje en arco (segundos, minutos u hora) o el tiempo total de viaje consumido en una red (por ejemplo, en veh-h/h). Demoras o longitudes de colas pueden ser similarmente comparadas.

El tiempo de viaje total consumido en la red y velocidad de la red se definen como sigue:

7.3. Justificación de las medidas adoptadas

Tradicionalmente se ha tomado el tiempo de viaje en vehículo como una de las principales variables a la hora de cuantificar el nivel de servicio del transporte público. Un dato revelador se puede extraer de las conclusiones del informe de "Caracterización de los potenciales usuarios del TUS y modelización de sus preferencias", en el cual queda de manifiesto que las variables más importante por la que los encuestados no utilizaban el TUS eran el tiempo de viaje y el tiempo de espera. Por lo tanto, resulta evidente que una mejora en estas variables cambiará la percepción sobre el servicio ofertado no solo de los usuarios actuales sino de los potenciales.

7.3.1. Creación del carril bus

El carril bus propuesto discurre desde Valdecilla hasta Puertochico, con la única excepción de los dos túneles, el de la Plaza México y el de la calle Burgos, que al tener un único carril por sentido imposibilita el disponer de un carril exclusivo para el autobús, y todas las glorietas, y por la calle Alcalde Vega Lamera. El carril bus propuesto está dividido en 9 tramos.

Tramo 1:

El primer tramo es el que queda entre las dos rotondas de la Avenida Valdecilla. Es un tramo con un gran ancho (tres carriles por sentido) y con ningún problema para destinar un carril para el uso exclusivo del autobús, ya que el tráfico de este tramo está muy lejos de su capacidad. No hay giros ni incorporaciones que entorpezcan la circulación de los autobuses. La sección final es la propuesta en la figura 45.

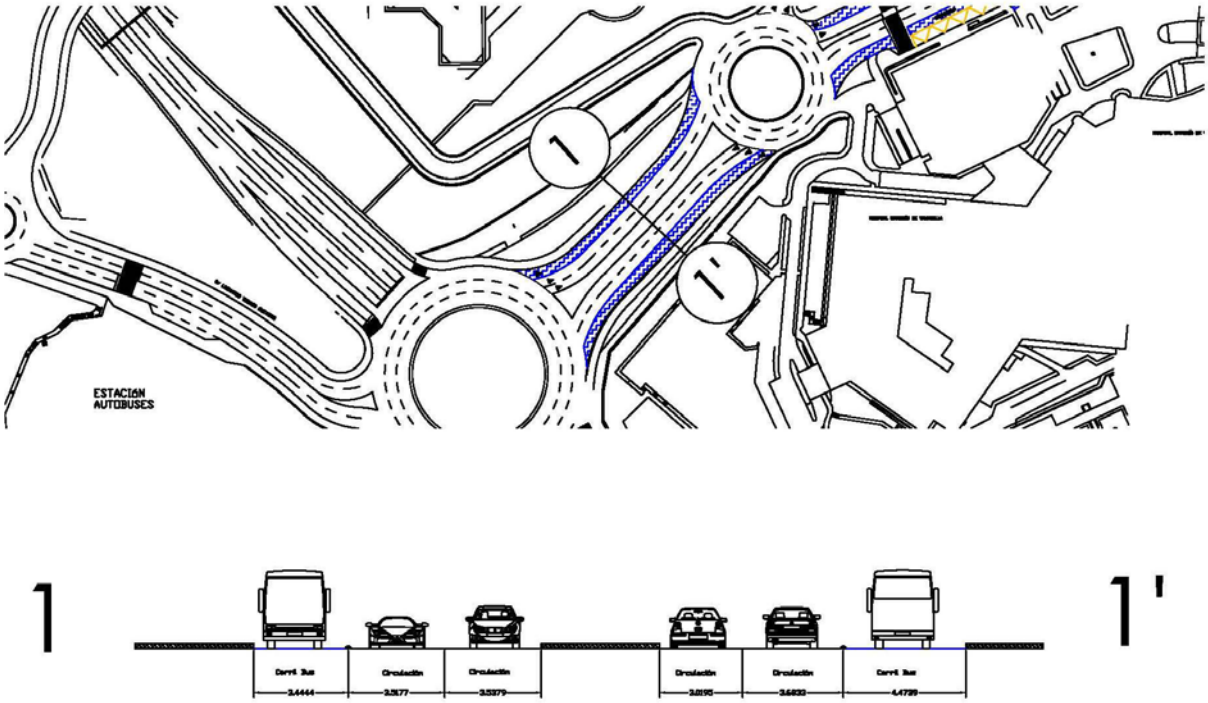


Figura 45: Sección propuesta

Tramo 2: Valdecilla.

El segundo tramo es el de las paradas de bus de la Av. Valdecilla y Valdecilla. Es un tramo en el que hay un sobre ancho que permite con facilidad que existan dos paradas segregadas, una en cada sentido, lo cual no entorpece a la circulación de los autobuses, ya que estas dos paradas pasaran a ser muy importantes, ya que serán la cabecera de algunas de las nuevas líneas.

En el sentido Valdecilla-Ayuntamiento existe el problema que al pasar del tramo 2 al tramo 3 hay un cuello de botella, ya que se pasa de 2 carriles para el uso de los vehículos privados a uno. Pero debido al aumento del uso del transporte público en detrimento del privado, no es de esperar que se formen grandes atascos, como ya se ha demostrado con la simulación que se ha realizado.

La sección final propuesta para este tramo es la que se muestra en la figura 46.

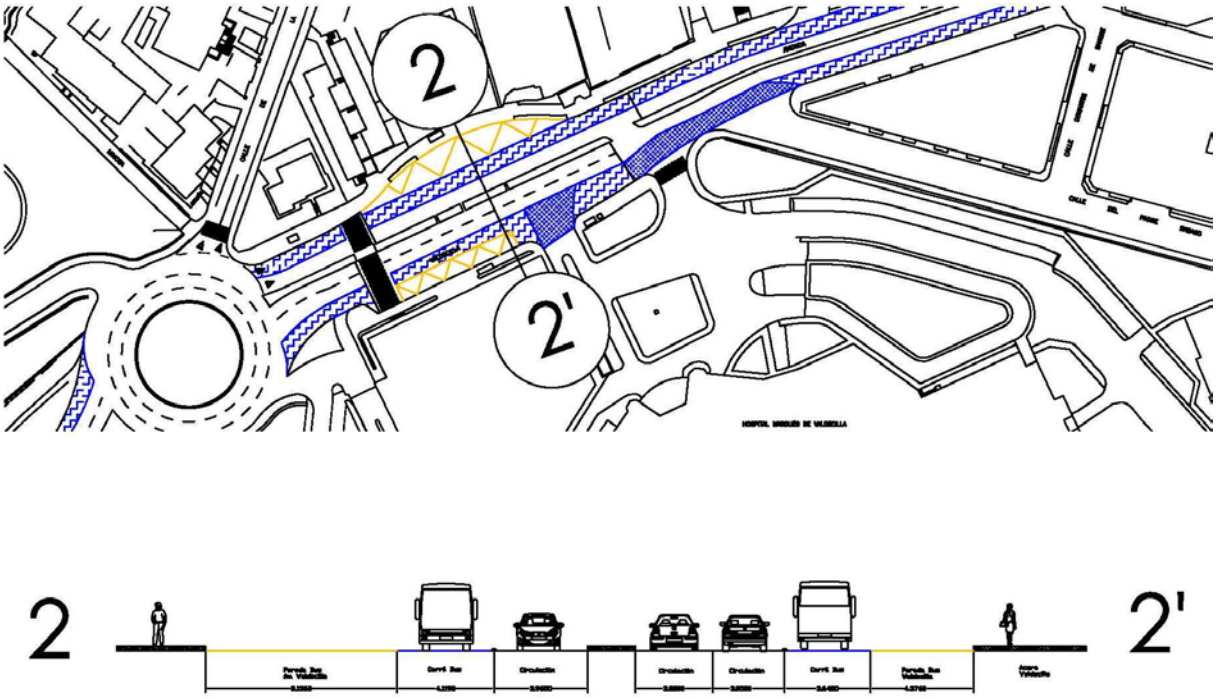


Figura 46: Sección propuesta

Tramo 3: San Fernando.

En este tramo se reserva directamente el carril derecho, dejando los dos restantes para la circulación (figura 47).

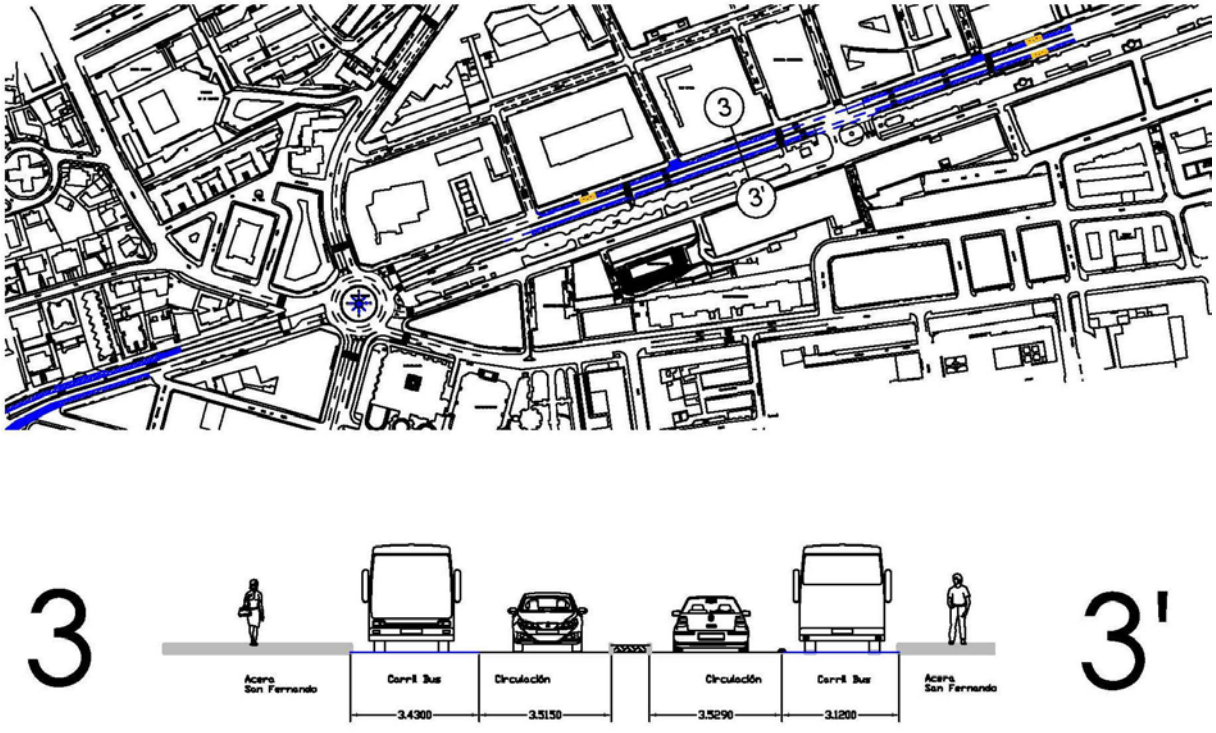


Figura 47: Sección propuesta

Tramo 4: Jesús de Monasterio.

El primer tramo comprende la salida del túnel de la calle Burgos y la intersección con el pasaje de Peña. Esta es una zona complicada debido a la gran cantidad de giros, incorporaciones, maniobras de trenzado y buses que coexisten en el vial principal. La sección propuesta (figura 48) aprovecha el actual carril derecho para convertirlo en carril bus y despejar en lo posible la actual parada de bus.

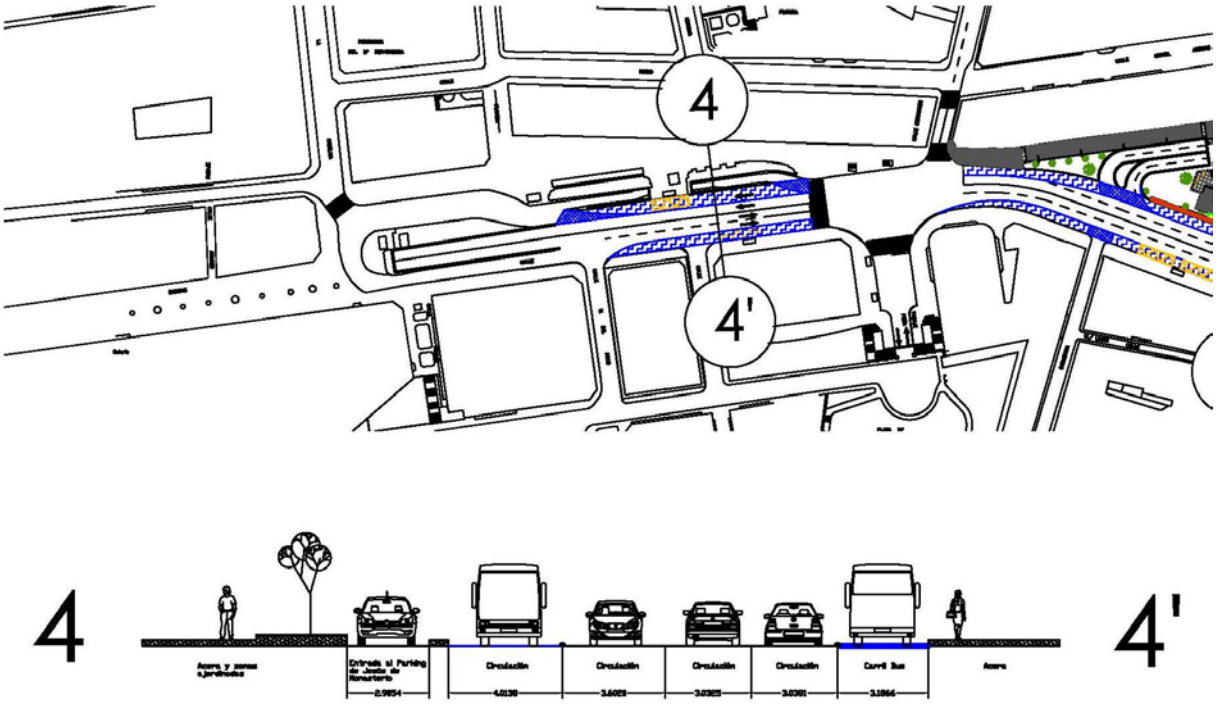


Figura 48.- Sección propuesta.

Tramo 5: Ayuntamiento.

El segundo tramo comprende la zona del Ayuntamiento. Aprovechando el aumento de sección del vial debido a la remodelación de la Plaza del Ayuntamiento se puede reestructurar la sección transversal para dejar dos carriles por sentido más un carril bus de 3.2 metros (figura 49).

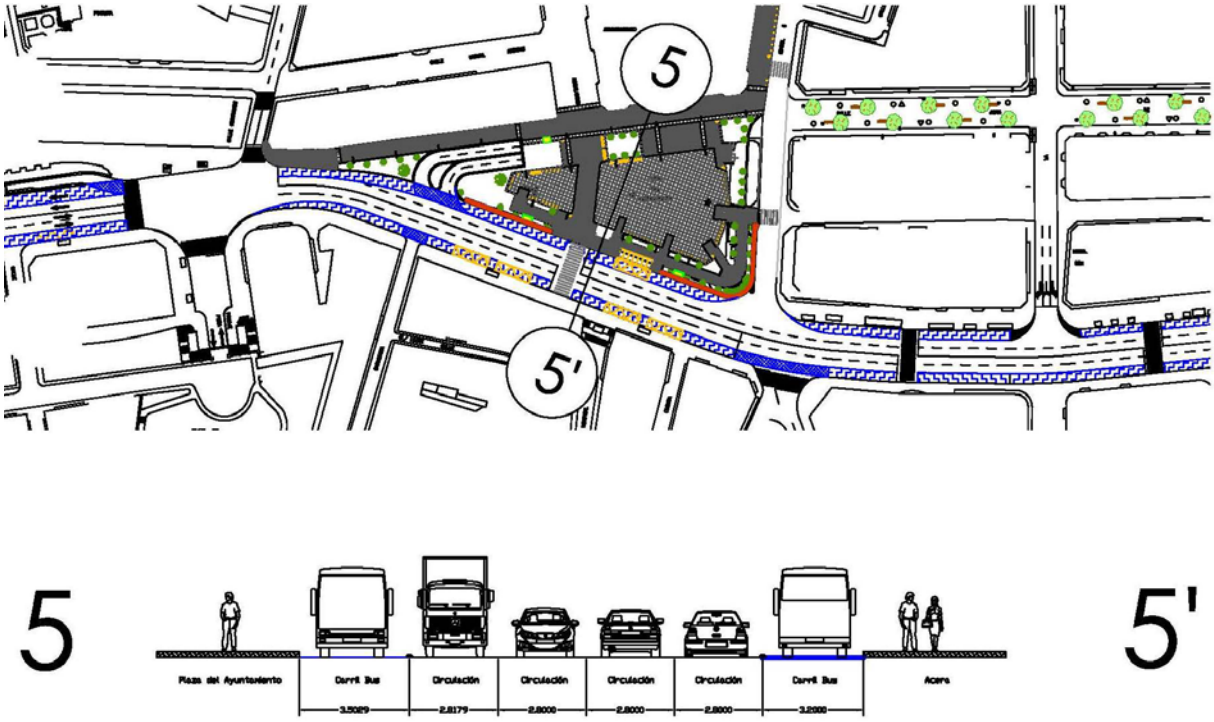


Figura 49.- Sección propuesta.

Tramo 6: Calvo Sotelo.

Actualmente ya existe una zona reservada debido a la parada dividida existente en el lado de correos, en el otro lado hay una zona reservada para la parada de los buses, contenedores y parking de motos, que pasará a ser, junto con un pequeño tramo de acera (70 cm), parte del nuevo carril bus. Quedando la sección tal y como aparece en la figura 50.

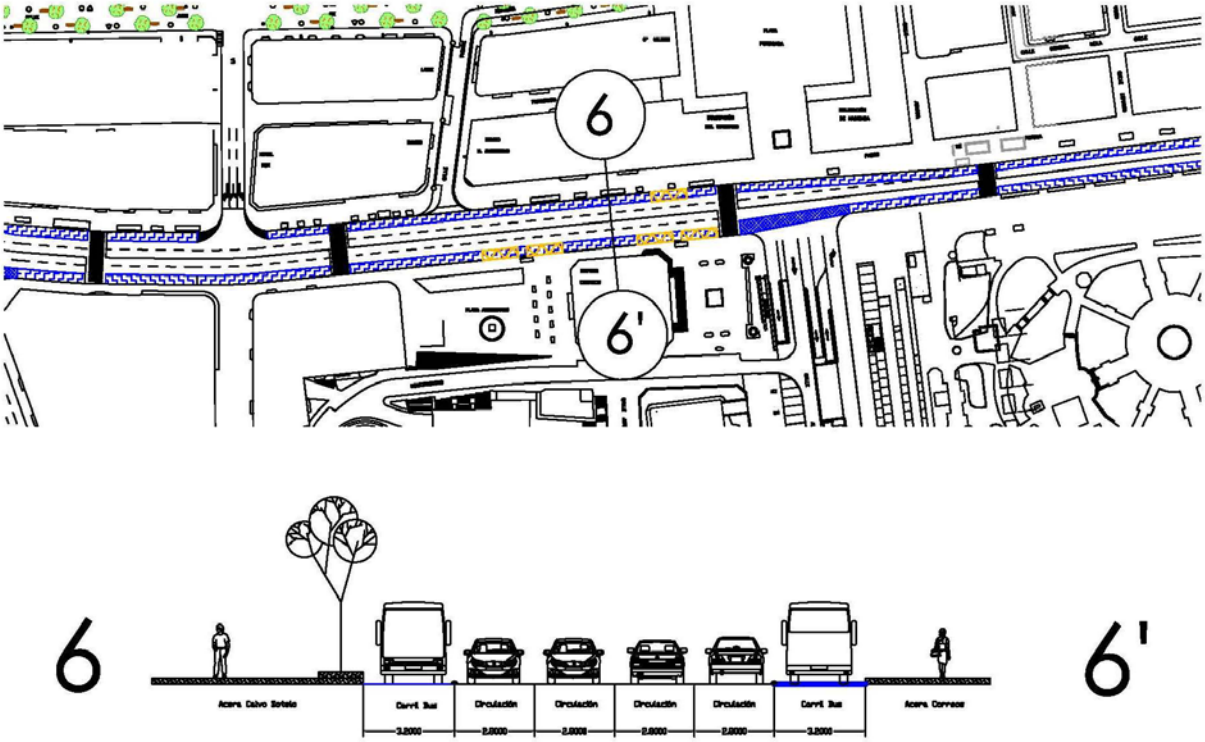


Figura 50.- Sección propuesta.

Tramo 7: Jardines de Pereda.

Este tramo no representa ninguna dificultad constructiva, ya que únicamente se va a destinar un carril por sentido para el carril bus, con la excepción del tramo que hay entre la rotonda de los Jardines de Pereda y el semáforo del Arco del Santander, ya que el número de vehículos que se dirigen hacia la calle Marcelino Sanz de Santuola es tan elevado que el semáforo produce unas colas que en determinados momentos pueden interferir en el paso de los autobuses. Por ello se ha decidido que en ese tramo no haya carril bus segregado del resto de la circulación, para que tanto coches como buses puedan incorporarse o salir del carril bus.

La sección definitiva es la que aparece en la figura 51.

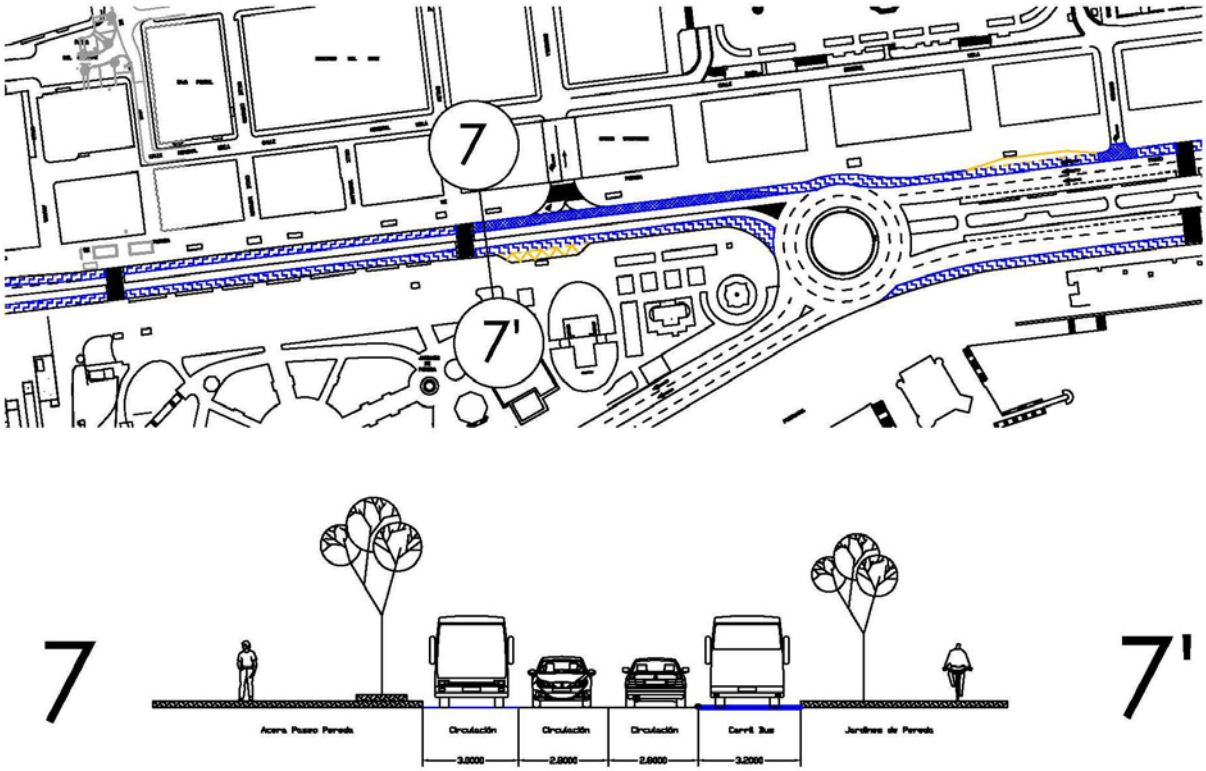


Figura 51.- Sección propuesta.

Tramo 8: Jardines de Pereda.

En este tramo se reserva directamente el carril derecho, dejando los dos restantes para la circulación (figura 52).

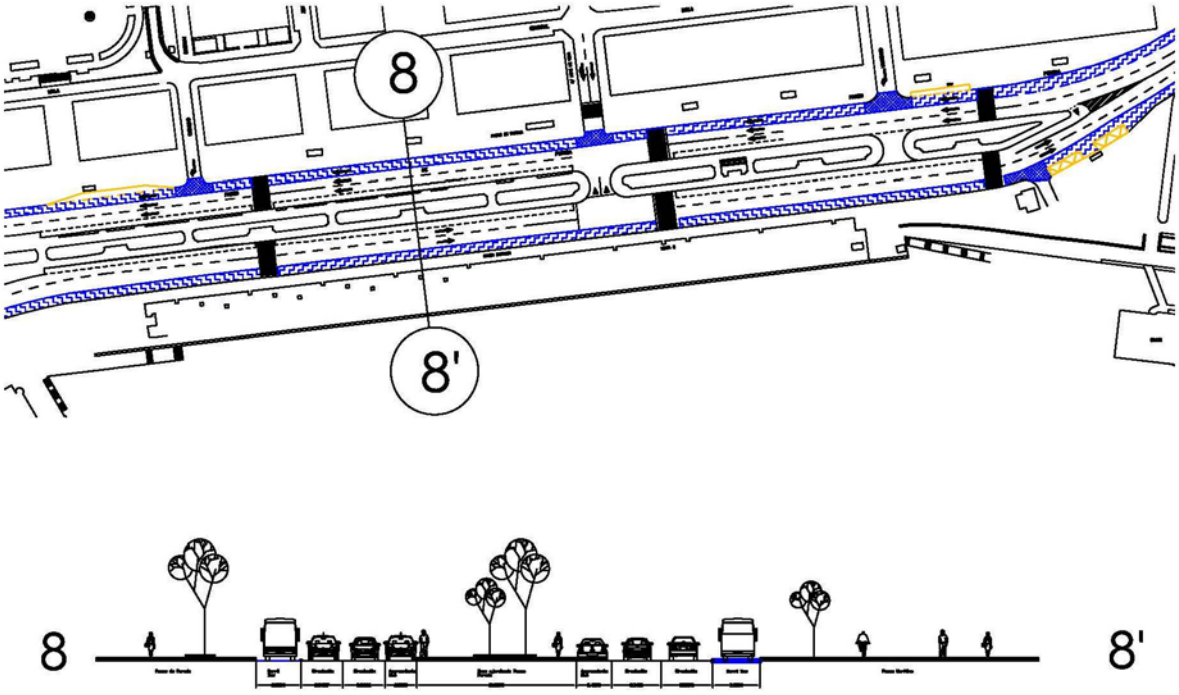


Figura 52.- Sección propuesta.

Tramo 9: Alcalde Vega Lamera.

En este tramo se reserva directamente el carril derecho, dejando un para la circulación (figura 53).

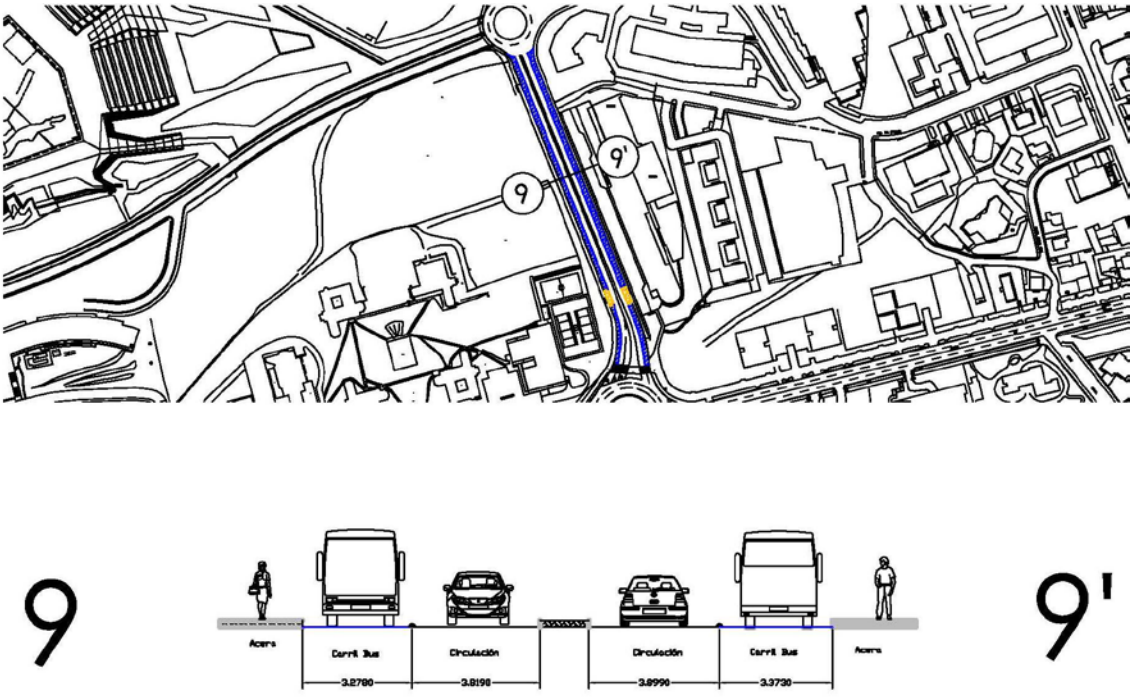


Figura 53: Sección propuesta

7.3.2. Aumento de la capacidad de las paradas

La eficiencia de operación de una parada está relacionada principalmente con la capacidad de ésta, y esta capacidad depende a su vez de los tiempos de sube/baja, y de las esperas adicionales debidas a la formación de colas de buses.

Es evidente que para un usuario de transporte público, el tiempo que el bus en el que está viajando está detenido debido a esperas a otro bus que está operando en una parada supone un tiempo extra en su tiempo percibido de viaje (Larraín y Muñoz, 2007).

Asimismo, para el operador también resulta pernicioso este fenómeno en cuanto a que disminuye su velocidad comercial y provoca una mala percepción del servicio por parte del usuario.

7.3.2.1. Operación de una parada de bus.

Si se considera una parada de bus con una sola área de parada, de tal forma que si un bus está ocupando el área, ningún bus más puede entrar y se tiene en cuenta el tiempo requerido por cada bus en el área de parada se puede establecer la capacidad de una parada como el número de buses que pueden utilizar el área de parada en un intervalo de tiempo.

Cuando un bus llega a una parada se pueden definir varias etapas:

(1) Parada vacía esperando a la llegada de un bus.

(2) Aproximación del bus.

(3) Deceleración

(4) Detención en el área de parada.

(5) Apertura de puertas y carga y descarga de viajeros.

(6) Cierre de puertas.

(7) Durante el transcurso de cualquiera de esas etapas, otros buses pueden llegar después formando una cola detrás del primer bus, esperando a que llegue a la fase de despeje del área de parada para poder entrar a la misma.

(8) Aceptación de gap para incorporarse al tráfico.

(9) Aceleración y despeje del área de parada.

(10) El segundo bus entra en el área de parada.

Por lo tanto, existe una demora en la parada debida al tiempo de carga y descarga de viajeros, pero también existe una demora adicional consistente en la suma del tiempo

perdido en la cola, tiempos de aceleración y deceleración, tiempo de aceptación de gap para incorporarse al flujo de tráfico y tiempo transcurrido entre la salida del bus precedente y la llegada del siguiente.

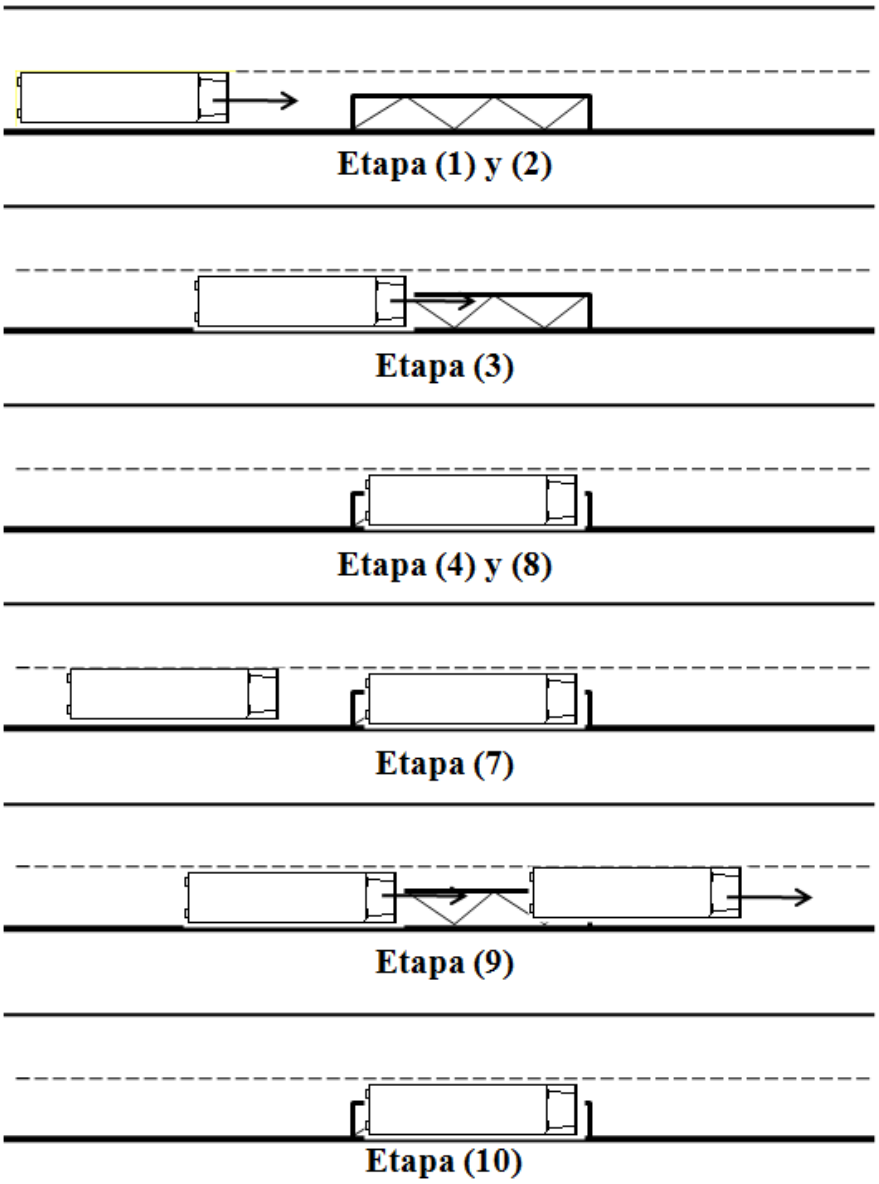


Figura. 54.- Etapas en la operación en una parada de bus

Estos tiempos de demora adicional son realmente significativos por lo que su optimización mejora indudablemente la velocidad comercial de los buses y, aunque muchos de ellos son constantes, el más importante es sin duda el tiempo perdido en cola, el cual depende indudablemente de la distribución de llegadas de los buses a las paradas.

Obviamente, al aumentar la demanda y el flujo de buses, la capacidad de una parada

como la aquí descrita se vuelve insuficiente, debiendo adoptar diversas soluciones para aumentar dicha capacidad

7.3.2.2. Capacidad de una parada de bus.

Como las paradas de bus se ubican en la calzada, su capacidad puede relacionarse con otros dispositivos viales, como las intersecciones (Fernández, 2001a). Dado que la función principal de los vehículos en una intersección es cruzar por ella, la capacidad de un acceso o carril de una intersección es el máximo número de vehículos que pueden entrar a la intersección por unidad de tiempo. Esta capacidad es el inverso del intervalo medio entre vehículos cuando hay una cola tratando de entrar a la intersección. Es decir:

$$Q_i = \frac{3600}{h} \qquad (13.3.)$$

Donde:

Q_i: capacidad del acceso *i* (veh/h)

h: intervalo medio entre vehículos de la cola (sg.)

De igual modo, la capacidad de una parada se puede definir como "el máximo número de buses por unidad de tiempo que pueden entrar al área de parada" (Gibson et al, 1989). Sin embargo, esta capacidad no está sólo ligada al intervalo medio entre buses, ya que en ocasiones hay una cola tratando de entrar a la parada, sino que, además, será función de:

Número de dársenas o sitios disponibles para realizar la transferencia de viajeros: teóricamente, cuantos más sitios disponibles, mayor número de buses podrán servir en la parada.

Diseño de éstas dársenas o sitios de transferencia: en serie en paralelo, etc.

Control del tráfico: se ha demostrado que la presencia de semáforos puede reducir notablemente la capacidad. En la revisión bibliográfica ya se han expuesto varios estudios sobre ello.

Demanda: el número de pasajeros que suben/bajan en cada bus es un aspecto crítico en el cálculo de la capacidad.

Al igual que en otras estaciones terminales, la función principal de los buses en una parada es detenerse para transferir pasajeros, en lugar de sólo cruzar por el área de parada. Luego, el máximo número de buses que pueden entrar a la parada estará relacionado con el tiempo durante el cual el área de parada está ocupada por buses transfiriendo pasajeros. Es decir:

$$Q_B = \frac{3600}{t_o} \qquad (13.4)$$

Donde:

Q_B: capacidad de una parada (bus/h)

t_o : tiempo de ocupación del área de parada (s)

El tiempo de ocupación del área de parada depende de los siguientes factores:

· t_l: tiempo de frenado y aceleración en la parada (sg.) ;

· t_p: tiempo detenido transfiriendo pasajeros (sg.) ;

· t_e: esperas internas por bloqueo de la salida (sg.) ;

· *n/s*: tiempo necesario para recorrer la parada (sg.) ;

· *n*: número de sitios de la parada;

· *s*: flujo de saturación del carril de la parada (bus/s).

Si el área de parada está compuesta por un solo sitio, pero no libre de obstrucciones, entonces (Fernández, 2001a):

$$t_o = t_l + t_p + t_e + \frac{l}{s} = t_c + t_p + t_e \qquad (13.5.)$$

Donde:

tc = t l + 1/s : tiempo de despeje del sitio (sg.)

Si el área de parada tiene varios sitios contiguos y linealmente dispuestos, la capacidad puede estimarse imaginando que la parada opera con un proceso cíclico de

bloqueo y desbloqueo de su entrada, al igual que una intersección semaforizada. Así, la capacidad puede expresarse como (Gibson et al, 1989):

$$Q_B = \frac{3600 \cdot n}{T} \qquad (13.6.)$$

Donde:

n: número medio de buses que puede entrar a la parada en un período de desbloqueo

T: tiempo de ciclo entre estados similares de la parada (sg.)

Los estados sucesivos de la parada son dos:

· entrada bloqueada durante un período t_b ;

· entrada libre durante un período t_d.

Luego, el tiempo de ciclo se descompone de la siguiente manera:

$$T = t_b + t_d \qquad (13.7.)$$

Donde:

$t_b = t_l + t_p + t^e$: tiempo de bloqueo del sitio que impide la entrada (sg.)

$t_d = n/s$: tiempo de "llenado" de la parada (sg.)

En el caso de sitios linealmente dispuestos y disciplina FIFO (First In, First Out), el sitio que impide la entrada es el último.

Combinando las Ec.(5.6.) y (5.7.) la capacidad, en buses por hora, de una parada de sitios múltiples se puede expresar como :

$$Q_B = \frac{3600 \cdot n}{t_b + \frac{n}{s}} \qquad (13.8.)$$

En la Ec.(5.8.), el número de vehículos *n* que puede entrar a la parada es tanto función de características físicas, como el número *m* de sitios, como operacionales, es decir, la forma de usar estos sitios ; en general, $n \leq m$. Asimismo, las componentes de t_b se pueden relacionar con variables físicas y de operación.

El tiempo t_l de aceleración y frenado estará condicionado por el tipo de buses que sirven a la parada y su forma de conducción. Así:

$$t_l = \frac{1}{2}\left(\frac{V_r}{a} + \frac{V_r}{f}\right) = \frac{V_r}{\gamma} \qquad (13.9.)$$

Donde:

V_r: velocidad media de recorrido de los buses (m/sg.)

a: tasa media de aceleración de los buses (m/sg^2)

f: tasa media de frenado de los buses (m/sg^2)

g: media armónica de las tasas de aceleración y frenado (m/sg^2)

El tiempo t_p para transferir pasajeros depende de cantidad de pasajeros que suben y bajan de cada bus en la parada. Esto se puede expresar como:

$$t_p = \begin{cases} \beta_0 + (\beta_1 p_s + \beta_2 p_b) ....., subidas / bajadas_sucesivas \\ \beta_0 + \max\{\beta_1 p_s ; \beta_2 p_b\} ....., subidas / bajadas_simultáneas \end{cases} \qquad (13.10)$$

Donde:

β_0: tiempo muerto por detención: abrir/cerrar puertas (sg.)

β_1: tiempo marginal de subida por pasajero (sg/pax)

β_2: tiempo marginal de bajada por pasajero (sg/pax)

p_s: número de pasajeros que sube al bus (pax)

p_b: número de pasajeros que baja del bus (pax)

Las esperas internas t_e se deben a fenómenos de congestión dentro del área de parada. Tal como en otros terminales, es el período durante el cual un bus no puede acceder o abandonar un sitio debido a restricciones impuestas por los otros vehículos o por condiciones del tráfico. En el caso de una parada con sitios linealmente dispuestos y disciplina FIFO, corresponderá al tiempo t_b del sitio aguas abajo.

La interdependencia entre las componentes t_b y n en paradas de sitios múltiples forma un complejo sistema de interacción entre pasajeros y buses al interior de la parada, lo que hace difícil calcular el valor de la capacidad con expresiones analíticas, excepto para condiciones muy particulares. Por ejemplo, sitio único, llegadas de pasajeros y buses a intervalos constantes, ausencia de congestión interna, etc.

Para cubrir un espectro más amplio de configuraciones físicas y condiciones de

operación, se han desarrollado modelos de simulación para su cálculo. Entre éstos se pueden mencionar IRENE (Gibson et al, 1989) y PASSION (Fernández, 2007) ya mencionados en la revisión del estado del arte. Algunos valores de capacidad son mostrados en la Tabla 1.

Se ha observado que un funcionamiento apropiado de una parada se obtiene para grados de saturación menores a 0,65 (Gibson y Fernández, 1995). Los valores de capacidad de la Tabla 1 corresponden a un grado de saturación igual a 0,6. Este será el grado de saturación práctico de paradas (notar la diferencia con el valor 0,9 en semáforos). En tales circunstancias, la longitud media de cola a la entrada de la parada será de 0,5 buses, o sea, como máximo 1 bus el 50% del tiempo, y la demora media resultará de aproximadamente 60 segundos por bus.

Tabla 13.7.- Capacidades prácticas de paradas de bus. (Gibson y Fernandez, 1995)

Tipo de Operación	Orden[1]				Desorden[2]
Tasa Subida (pax/bus)	12	8	4	2	8
Tasa Bajada (pax/bus)	6	4	2	1	4
Número de Sitios	CAPACIDAD PRÁCTICA[3] (bus/h)				
2	60	80	100	130	70
3	80	105	125	160	80

1 Disciplina FIFO, buses paran una vez en el sitio más próximo a la salida.

2 Adelantamiento permitido (AP), detenciones múltiples y en cualquier sitio.

3 Estimada para un grado de saturación 0,6.

En resumen, las capacidades necesarias para que paradas simples operen eficientemente están entre 60 y 160 buses por hora. Además, la influencia de intersecciones semaforizadas cercanas puede producir reducciones de hasta un 40% en la capacidad (Gibson y Fernández, 1995). Como regla práctica muy general, se puede considerar un valor de 30-60 bus/h/sitio, dependiendo principalmente de la tasa de subida de pasajeros por bus y de la disciplina de uso de los sitios.

También existen expresiones analíticas de capacidad de paradas de buses. Entre las más difundidas se encuentran las del Highway Capacity Manual, HCM (TRB, 2000), posteriormente desarrolladas en el Manual de Capacidad y Calidad de Servicio de Transporte Público (TRB, 2003).

Modelo del Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQS, 2003).

El TCQS establece la siguiente fórmula para estimar la capacidad de una parada de sitios múltiples en la calzada:

$$Q_N = N_{eb} \frac{3600 \cdot \left(g/C\right)}{t_c + \left(\max(X_n \cdot t_s, Y_n \cdot t_b) + t_{o,c}\right) \cdot \left(\left(g/C\right) + Z_a \cdot c_v\right)} \cdot f_m \qquad (13.11)$$

Donde:

Q_N : capacidad de una parada de *N* sitios (bus/h)

N_{eb}*:* sítios o dársenas efectivas por parada.

g/C: razón de verde efectivo del semáforo de influencia en la parada (si lo hubiera).

t_c: tiempo de despeje entre dos buses consecutivos (sg.)

Z_a: factor que establece con qué frecuencia un bus se encuentra al llegar la parada ocupada.

X_n: demanda media de pasajeros que toman el bus en la parada n (pax)

Y_n: demanda media de pasajeros que se bajan del bus en la parada n (pax).

t_s: tasa de subida (sg/pax).

t_b: tasa de bajada (sg/pax).

c_v = coeficiente de variación del tiempo de ocupación.

f_m: factor de penalización para condiciones de tráfico mixto.

En la Ec.(5.11.), si no hay semáforo aguas abajo, entonces *(g/C)* = 1,0. Las tasas de subida al bus dependen del número de puertas, número de validadores, tipología de sistema de pago y la ocupación del propio bus. La tasa de bajada depende casi exclusivamente del número de puertas de salida disponibles. En ambos casos el TCQS 2003 trata además el impacto de sillas de ruedas, bicis, coches de bebé, etc. en los tiempos de subida y bajada.

Las figuras XX y XX muestran las variaciones de capacidad de una parada de bus ante diversos valores del tiempo de operación en la parada y proporciones de verde.

El TCQS también sugiere diferentes valores de N_{eb} para configuraciones lineales de sitios sin posibilidades de adelantamiento entre los buses (Tabla 2). En esta tabla se puede apreciar que la eficiencia de cada dársena va disminuyendo exponencialmente.

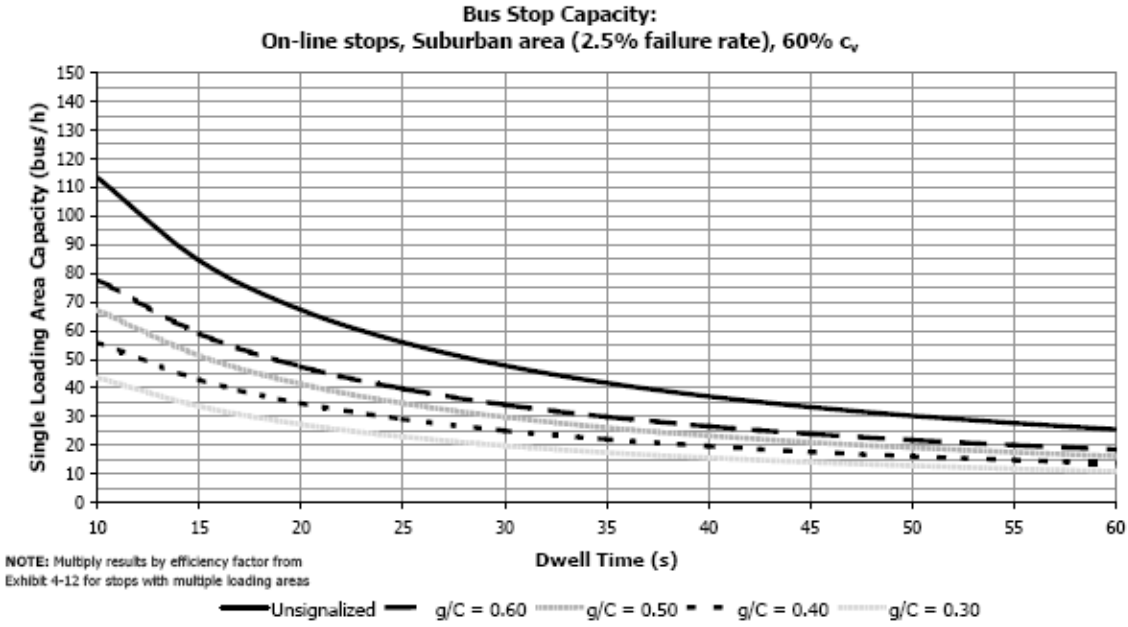


Fig. 55.- Capacidad de una parada de bus en áreas suburbanas en función de la operación del semáforo y tiempo de parada (TCQS, 2003)

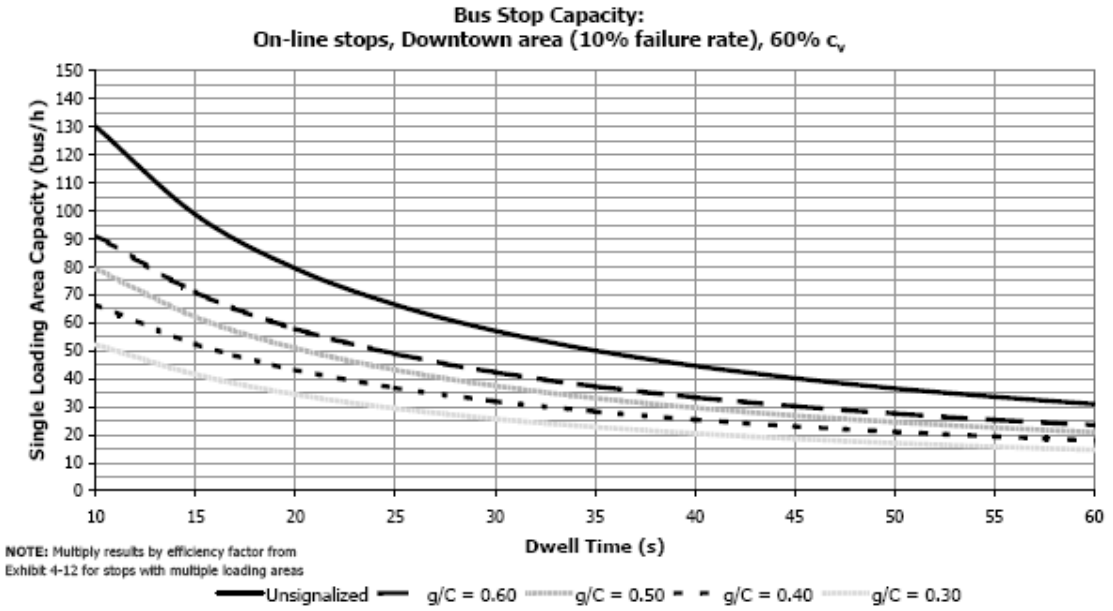


Fig. 56.- Capacidad de una parada de bus en áreas urbanas en función de la operación del semáforo y tiempo de parada (TCQS, 2003).

En cuanto a la influencia del control de tráfico, en la tabla 3 se adjunta una estimación de capacidad de paradas de bus en función de la proporción de verde de un semáforo aguas debajo de una parada.

Tabla 13.8.- Eficiencia según el número de sitios en una parada (TCQS, 2003).

	On-Line Loading Areas				Off-Line Loading Areas	
	Random Arrivals		Platooned Arrivals		All Arrivals	
Loading Area #	Efficiency %	Cumulative # of Effective Loading Areas	Efficiency %	Cumulative # of Effective Loading Areas	Efficiency %	Cumulative # of Effective Loading Areas
1	100	1.00	100	1.00	100	1.00
2	75	1.75	85	1.85	85	1.85
3	70	2.45	80	2.65	80	2.65
4	20	2.65	25	2.90	65	3.25
5	10	2.75	10	3.00	50	3.75

Tabla 13.9.- Capacidad de una parada según el número de sitios, operación del semáforo y tiempo de parada del bus (TCQS, 2003).

	Number of On-Line Linear Loading Areas									
Dwell	1		2		3		4		5	
Time (s)	g/C 0.50	g/C 1.00	g/C 0.50	g/C 1.00	g/C 0.50	g/C 1.00	g/C 0.50	g/C 1.00	g/C 0.50	g/C 1.00
30	48	69	84	120	118	169	128	182	133	189
60	27	38	48	66	68	93	74	101	76	104
90	19	26	34	46	48	64	52	69	54	72
120	15	20	26	35	37	49	40	53	41	55

En lo que se refiere a las paradas de bus divididas, Fernández et al., (2007) demostraron que para flujos de buses elevados la capacidad de la parada situada aguas arriba se ve afectada por el flujo de buses que deben parar en la parada de aguas abajo. Así, la capacidad de una parada doble (Q_E) puede definirse como la suma de las paradas de aguas arriba (Q_U) y aguas abajo (Q_D):

$$Q_E = Q_U + Q_D$$
$$Q_U = \begin{cases} 154 - 0.95 \cdot q_d & para\ 3\ sitios \\ 119 - 1.29 \cdot q_d & para\ 2\ sitios \end{cases} \qquad (13.12)$$

donde q_d es el flujo de buses que paran en la parada de aguas abajo.

7.3.2.3. Tipos de Paradas propuestas.

Atendiendo al razonamiento del apartado anterior se proponen las siguientes actuaciones en las paradas del corredor:

Paradas del Ayuntamiento y Correos/Catedral: Se propone la creación de una parada dividida en dos marquesinas, cada una de ellas con dos áreas de parada cada una (figura 57).

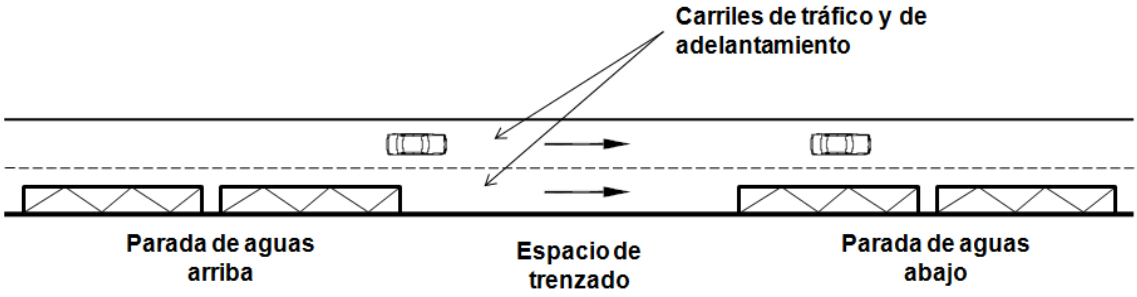


Figura. 57.- Parada de bus doble-dividida

Paradas de Jardines de Pereda y Puertochico:

Se propone añadir un área de parada a la actual (figura 58).

La asignación de líneas a paradas se ha realizado siguiendo una metodología innovadora desarrollada por el GIST, la cual analiza diferentes combinaciones posibles mediante un algoritmo genético y escoge aquella que minimiza el coste social. Según esto, la asignación a cada parada queda así:

- Parada de aguas arriba: L3, L5c2, L6c2, L11, L12, L17 y L18.
- Parada de aguas abajo: L1, L2, L4, L7c2 y L13.

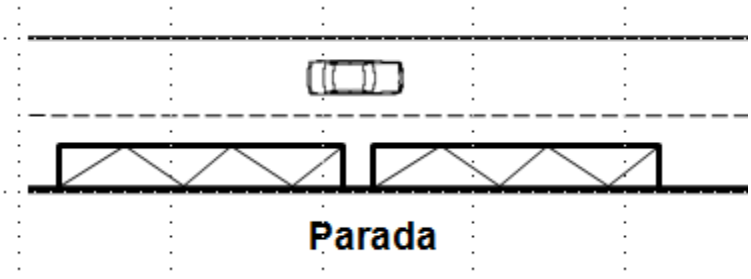


Figura. 58.- Parada de bus doble

Parada de San Fernando:

Si bien esta parada no pertenece al corredor, se recomienda también la misma tipología que las paradas anteriores: parada doble (figura 59).

Parada de Valdecilla:

Se propone segregar la operación de los buses regionales de los urbanos, de tal manera que se eviten conflictos e interferencias entre los vehículos. Para ello se propone una ordenación basada en paradas en paralelo como la mostrada en la figura 60.

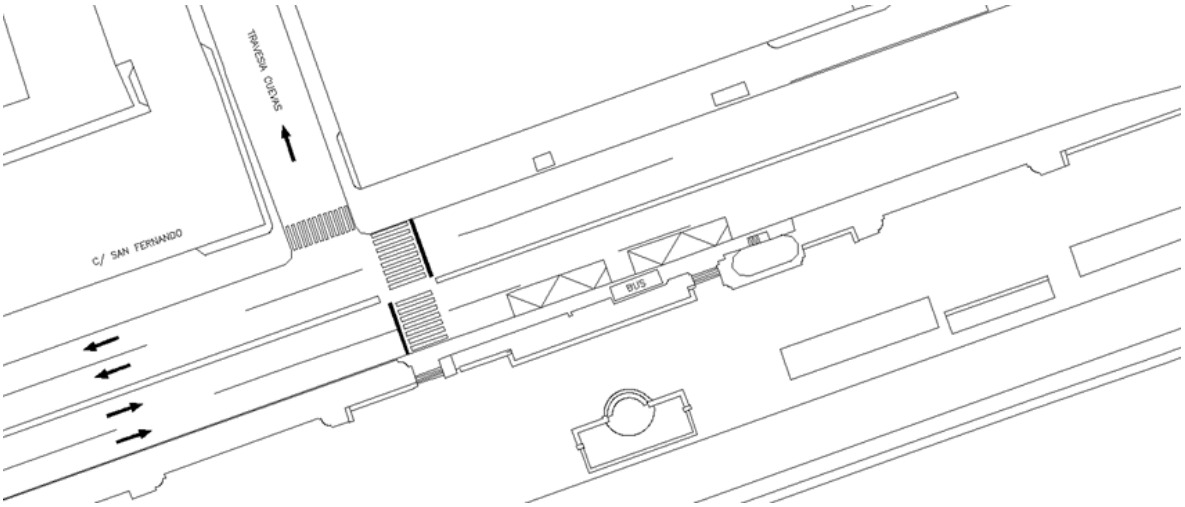


Figura. 59.- Parada de bus doble en San Fernando

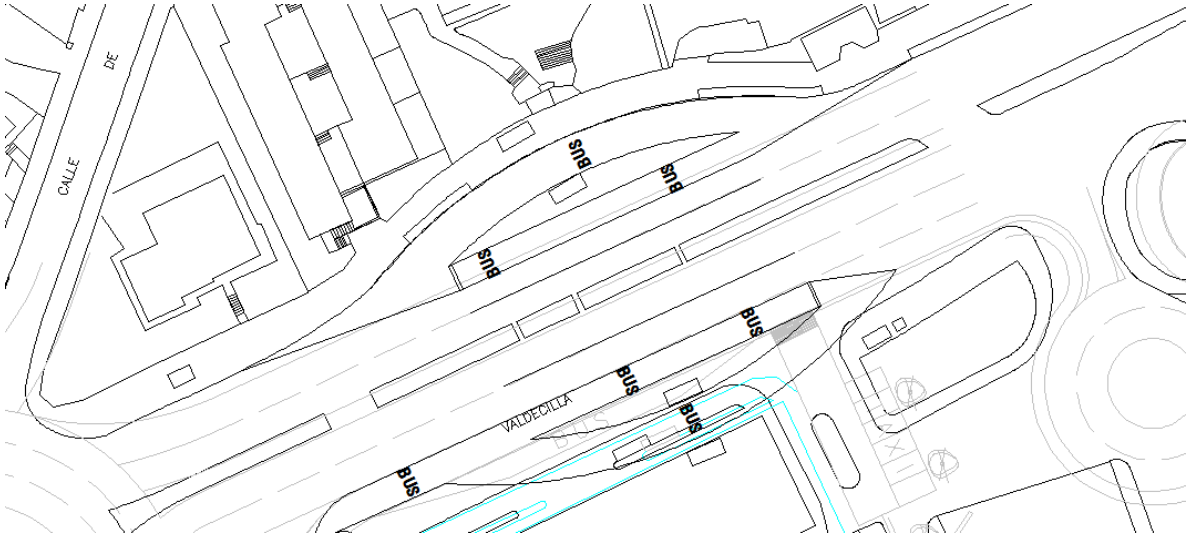


Figura. 60.- Ordenación propuesta en la parada de bus de Valdecilla

7.3.2.4. El caso de Santander

La capacidad, entendida como buses/hora, de un corredor la determina el elemento de menor capacidad de todos los que lo componen: carril bus, paradas e intersecciones. Por ello, para que el sistema público de transporte este diseñado lo más eficientemente posible, la capacidad de los tres elementos tiene que ser parecida, de manera que no haya ningún elemento que lastre a los otros dos.

En el caso de Santander, el elemento más restrictivo son las paradas de bus. Las mediciones realizadas arrojan una capacidad de una parada sencilla en 30-40 buses/hora dependiendo de la hora del día y de la demanda. Analizando los buses/hora en las principales paradas de la ciudad (figura 61) se obtiene que las paradas de Jesús de Monasterio, Jardines de Pereda y Ayuntamiento son las que más problemas de capacidad presentan. Sin embargo, el resto de paradas del corredor tienen un flujo cercano a la capacidad.

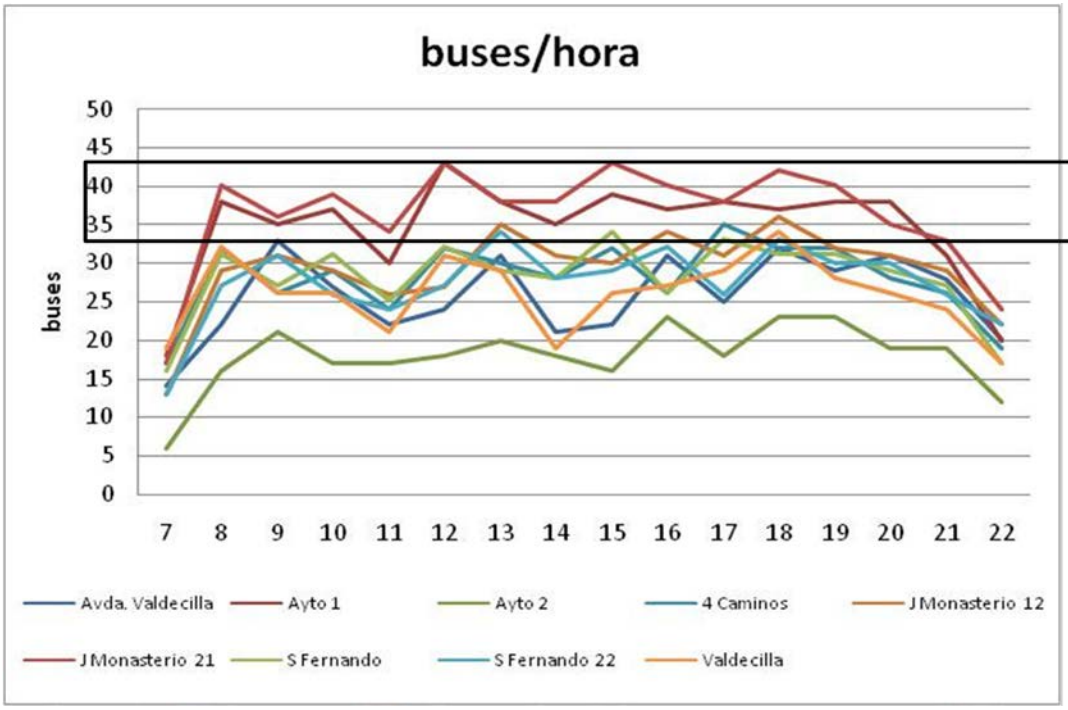


Figura. 61.- Flujo de buses para distintas paradas de la ciudad.

En base a esto, se propone la ampliación de capacidad de las paradas. La opción más

intuitiva es la de dos áreas de parada linealmente dispuestas. Esta medida ya se ha aplicado con éxito en varias ciudades. El ejemplo mostrado en la figura 62 corresponde con las paradas dobles de la Avda. de la Diagonal en Barcelona.

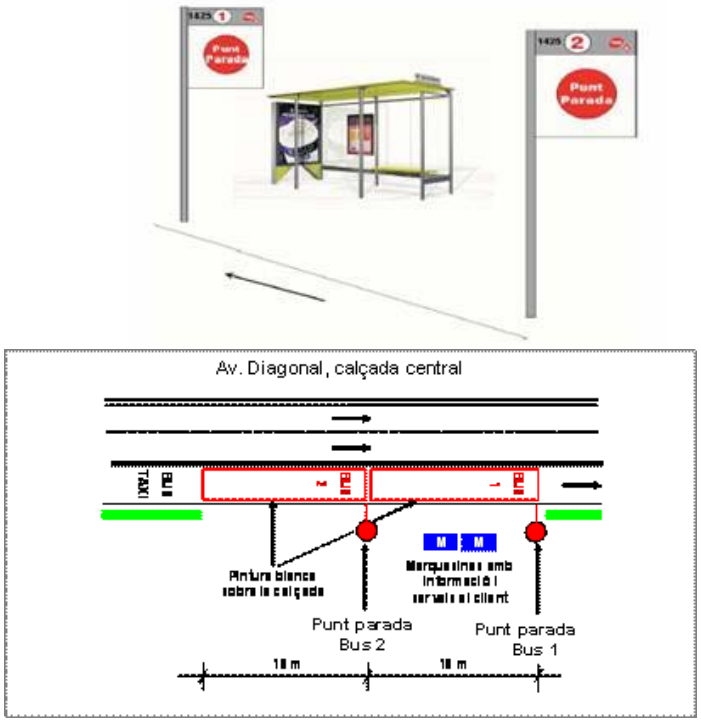


Figura. 62.- Ejemplo de parada doble.

Sin embargo, existen puntos en los que por razones de espacio o bien por flujo de buses, esta medida sigue siendo insuficiente. Lo anterior lleva al concepto de paradas divididas, en la cual una estación se divide en otras más pequeñas y eficientes para atender a la demanda de pasajeros y buses aumentando así la capacidad. Según esto, la capacidad de una estación dividida será del 100% en la de aguas abajo y del 93% en las anteriores a ella siguiendo los criterios de diseño que los autores recomiendan. Fernández (2001) y Fernández y Tyler (1999) también analizan este fenómeno y exponen unos criterios de diseño y ubicación de ambas paradas:

Un carril de adelantamiento que permita a los buses que no realizan la parada en el mismo punto adelantar a los de la parada de aguas abajo para mantener la independencia de las operaciones.

Un espacio mínimo de 3 buses entre los puntos de parada para favorecer las maniobras de trenzado.

Una pequeña separación entre dársenas de una misma parada que permita al segundo bus salir en caso de que el primero continúe detenido.

Fernández et al., (2007) demostraron que para flujos de buses elevados la capacidad de la parada situada aguas arriba se ve afectada por el flujo de buses que deben parar en la parada de aguas abajo, con lo que la capacidad se reduce con respecto a los trabajos anteriores.

7.3.3. Priorización semafórica

7.3.3.1. Sistema de priorización semafórica (Ahmad Kamal Haridan Jajuli)

La fiabilidad de los sistemas de transporte público es considerada como un factor de importancia crítica por los usuarios, las compañías operadoras y las autoridades. La falta de fiabilidad y de cumplimiento del horario incrementa el nivel de ansiedad y de incomodidad entre los pasajeros, lo que acaba produciendo, a la larga, un menor uso de los servicios públicos de transporte.

En ciudades muy congestionadas, durante las horas punta o en cualquier otra situación de alta densidad de tráfico, el tráfico en general tiene un gran impacto en la fiabilidad del transporte público. Entre las diferentes iniciativas estudiadas por los responsables del transporte público para la reducción de ese impacto, existen soluciones como las líneas de autobús express o los sistemas de priorización semafórica. En este artículo se aborda este segundo tipo.

Los sistemas de priorización semafórica (TLPS) están diseñados con el objetivo de dar prioridad de paso a los autobuses públicos que se aproximen a una intersección. El TLPS requerirá un intercambio de información entre el Sistema de Ayuda a la Explotación (SAE) y el sistema de control de tráfico utilizado en la ciudad o en el área geográfica. Una vez que se ha establecido la comunicación entre estos sistemas, el SAE emitirá peticiones de prioridad, ya sea desde los servidores o directamente desde los vehículos; recibidas esas peticiones en el sistema de control de tráfico, el controlador las evaluará y decidirá si atiende la petición y da al autobús luz verde o si mantiene el ciclo establecido para los semáforos.

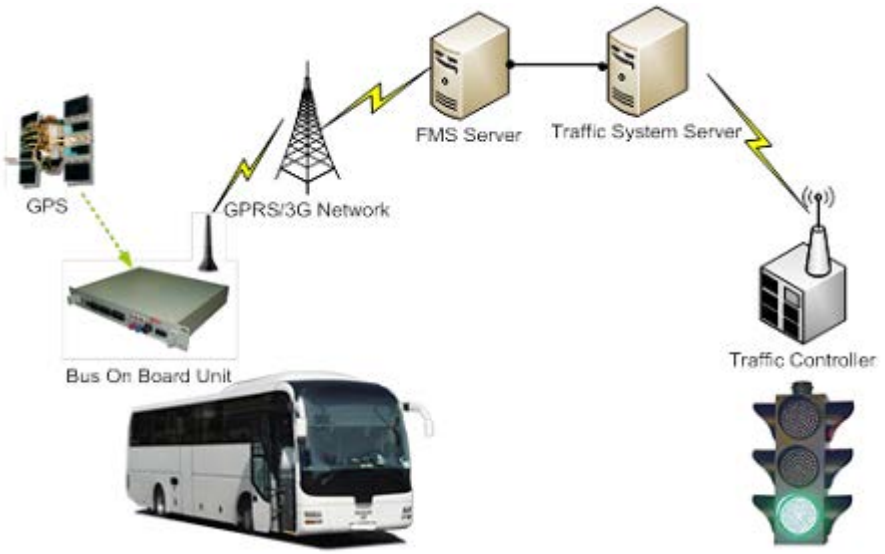


Figura 63: Funcionamiento de los sistemas de priorización semafórica.

Hay diferentes formas de aplicar un sistema de prioridad semafórica, pero todas ellas comparten una serie de requisitos que deben cumplirse:

- **Determinación del cumplimiento del horario:** no queremos emitir una petición de prioridad si el autobús está circulando con puntualidad o, incluso, va adelantado a su horario. Asimismo, algunos gestores tampoco querrán emitir una petición si el autobús lleva un retraso excesivamente grande, ya que la diferencia conseguida iba a resultar insignificante y seguiría incumpliendo el horario. Esta determinación del cumplimiento del horario solo puede realizarse mediante un sistema avanzado de ayuda a la explotación.
- **Detección de intersecciones:** la detección de la llegada a una intersección es un aspecto vital a la hora de decidir la emisión de una petición. Estas detecciones pueden basarse en software y estar realizadas por la unidad embarcada en el vehículo o bien pueden conseguirse mediante una combinación de sensores instalados en la vía y en el autobús. La forma de llevar a cabo estas detecciones es probablemente el elemento clave en lo que respecta al diseño del sistema de priorización semafórica. La selección del método repercutirá en el coste y en la complejidad de la ejecución del proyecto, así como en la exactitud del sistema final.

  Una vez que se ha detectado la entrada en un cruce, la petición debe también

indicar la salida deseada del mismo, ya que la mayoría de las intersecciones tienen salidas a diversos destinos.

- **Determinación de la petición de prioridad.** El sistema de ayuda a la explotación no tendrá información sobre el estado del tráfico general en tiempo real. En consecuencia, la única evaluación que realizará será relativa a los diferentes autobuses que estén emitiendo peticiones de prioridad. En el caso hipotético de que dos autobuses diferentes llegaran a la misma intersección y ambos estuvieran circulando con retraso, decidirá cuál de las peticiones de prioridad se remite finalmente al sistema de control de tráfico.

  El paso siguiente, una vez recibida la petición de prioridad en el sistema de control de tráfico, es que éste decida si se atiende o no esa petición. En el caso de una intersección próxima a una estación importante, podría suceder que se recibieran peticiones de prioridad cada minuto de diferentes autobuses, lo que finalmente tendría un gran impacto en el resto del sistema de regulación del tráfico.

Los sistemas de priorización semafórica para el transporte público en autobús son iniciativas muy interesantes que han de ser evaluadas por operadores y autoridades de transporte público. Pueden mejorar la fiabilidad de la duración del trayecto, incrementando con ello la preferencia por el transporte público frente al uso de vehículos particulares.

7.3.3.1. Solución adoptada

Además de actuaciones en las paradas se contemplan dos propuestas de priorización semafórica:

La primera actuación propuesta es en los pasos de peatones del Paseo Pereda que se muestran en la figura 64. Debido a que solamente la nueva línea pasa por esa zona, se recomienda garantizar siempre la fase de verde ante el paso del bus. Esta medida no resulta perniciosa para la coordinación semafórica de la zona puesto que el semáforo no controla ninguna intersección si no que solo el paso de peatones.

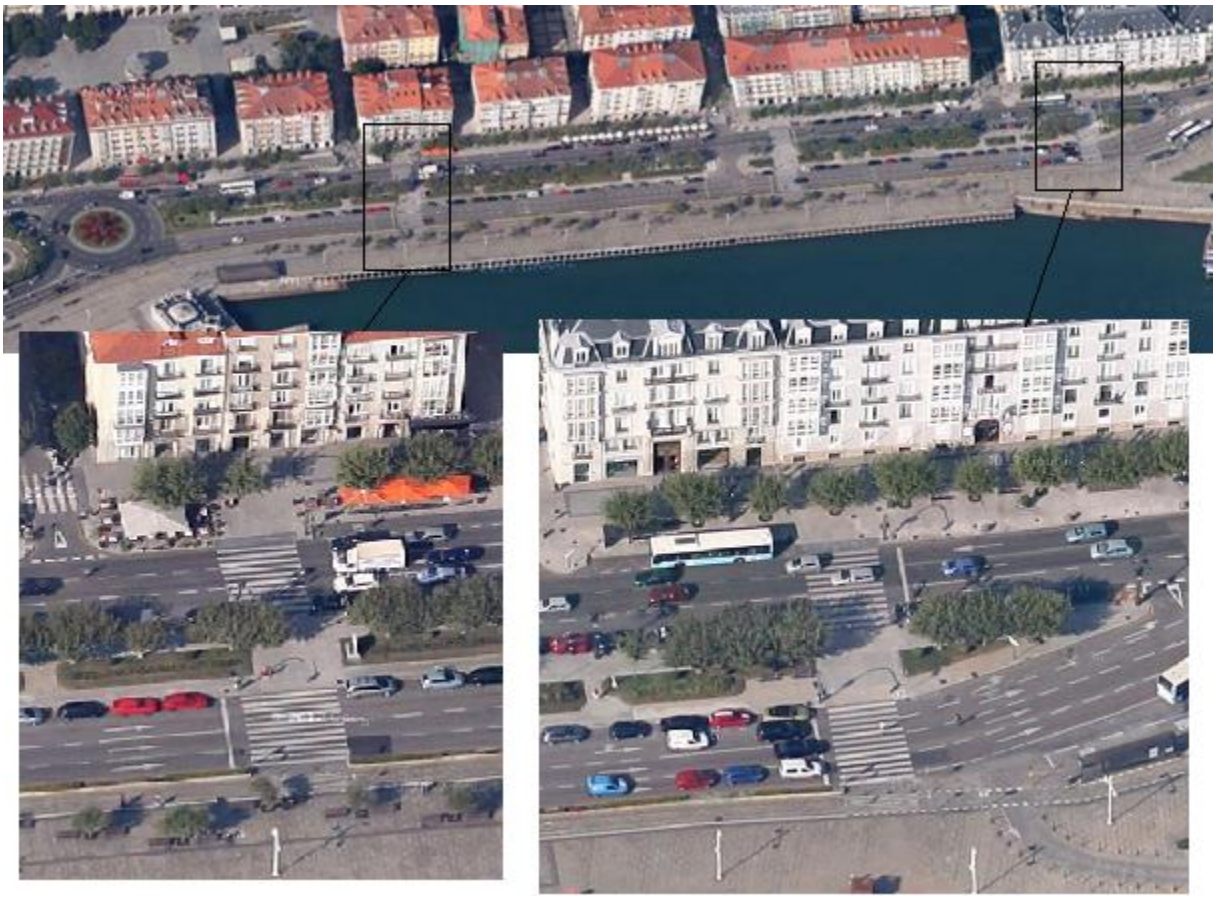


Figura 64: Pasos de peatones en los que se ha propuesto la priorización semafórica.

La segunda de ellas se pretende aplicar en la intersección del Paseo de Pereda con Lope de Vega. En el lado más cercano al mar, no hay ningún problema, ya que actualmente el semáforo en Paseo de Pereda se cierra para dar paso a los vehículos procedentes de Lope de Vega. Si el bus tiene ahora carril reservado, es evidente que estos vehículos no van a entrar en conflicto con él. Por lo tanto, resulta innecesaria la parada en este semáforo. Por ello se contempla que el bus tenga siempre fase verde, deteniéndose solamente en el caso de que algún peatón active el semáforo para cruzar por el paso de peatones situado aguas debajo de la intersección (figura 65).

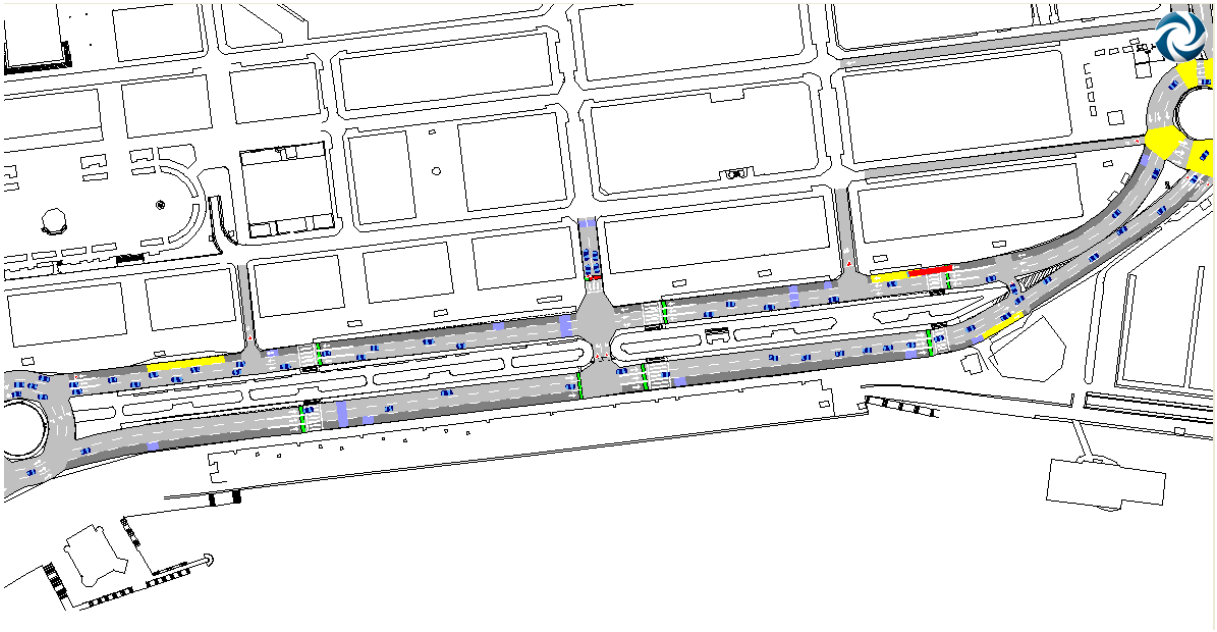


Figura 65.- Priorización semafórica propuesta en Paseo de Pereda.

7.3.4. Medidas complementarias

Además de las ya expuestas es recomendable adoptar las siguientes medidas:

- Prohibición de operación de bus interurbano: Puntos de Parada: Valdecilla (Norte) y Estación de Autobuses. Para ello se ha propuesto en el capítulo de paradas una ordenación segregada de transporte urbano y regional en la parada de Valdecilla.
- Carril bus solo para TUS y TAXI. Dado que solamente se dispone de un carril reservado y las paradas no están segregadas, el tráfico superfluo de buses restaría capacidad de operación al corredor.
- Prohibición al TAXI de recoger/dejar viajeros en las paradas de bus.
- Vigilar y sancionar ocupaciones indebidas del carril bus.
- No se recomienda separación física (salvo en zonas puntuales) por problemas de espacio y operación.

7.4. Resultados

Tal y como se ha dicho en el apartado 7.2, primero se realizó un modelo a nivel macro de la red completa de Santander, en VISUM. En este modelo se introdujo las características del servicio en las 4 situaciones. En cada situación, se realizó un reparto bimodal, entre el modo de transporte autobús y el vehículo privado. Los datos de los repartos modales se encuentran recogidos en la siguiente tabla.

	ACTUAL	SITUACIÓN 1	SITUACIÓN 2	SITUACIÓN 3	SITUACIÓN 4
Coche	45663	45283	45907	43289	42897
Bus	3952	4332	3708	6325	6718

Figura 67: Reparto modal de los escenarios.

Viendo que la situación 2 no es favorable para nuestro propósito de fomentar el transporte público, ya que se reduce su uso, no quisimos aplicarlo en el modelo de microsimulación. La explicación de porqué este escenario no resultó favorable, si en un principio era una mejora del anterior, es muy sencilla. La oferta del transporte público no se mejoró demasiado, pero se disminuyó mucho la capacidad de las calles principales de Santander, por lo tanto, aumentaron los atascos en estas vías, afectando también al transporte público, lo que hizo que perdiese la ventaja que en un principio tenía.

En cambio, en la situación 3 se mejoraron las frecuencias de casi todas las líneas, mejorando el servicio de todas las zonas de Santander, tanto la zona centro como las más alejadas de él. De esta forma se reduce mucho el número de viajeros que utilizan el vehículo privado para realizar un viaje al centro de Santander.

SITUACIÓN ACTUAL																		
Líneas	**1**	**2**	**3**	**4**	**5C1**	**5C2**	**6C1**	**6C2**	**7C1**	**7C2**	**11**	**12**	**13**	**14**	**16**	**17**	**18**	**19**
Intervalos (min)	15	18	15	15	12	12	30	30	14	14	25	30	30	21	15	60	60	60

Figura 68: Intervalos actuales de las líneas del TUS.

SITUACIÓN 3																			
Líneas	**BRT**	**1A**	**1B**	**3**	**4**	**5C1**	**5C2**	**6C1**	**6C2**	**7C1**	**7C2**	**11**	**12**	**13A**	**13B**	**14**	**16**	**17**	**18**	**19**
Intervalos (min)	5	15	15	17	16	10	10	17	17	16	16	15	16	15	16	15	15	15	17	15

Figura 69: Intervalos en la situación 3 de las líneas del TUS.

En las nuevas situaciones se modificó el trazado de gran parte de las líneas, creando líneas nuevas a partir de otras y eliminando las líneas que se superponen. El recorrido de las líneas 5C1 y 5C2 es el único que no se ve modificado. La actual línea 2, como coincide en gran parte del recorrido con la línea 1, las vamos a juntar.

Las líneas 1 y 13 se dividen en 2 cada una, quedando así las líneas 1A, 1B, 13A y 13B. Las líneas A son la parte que hay al oeste de Valdecilla y las B son la partes que hay en el Sardinero, Cueto, etc. En el siguiente mapa se puede apreciar los recorridos de las diferentes líneas.

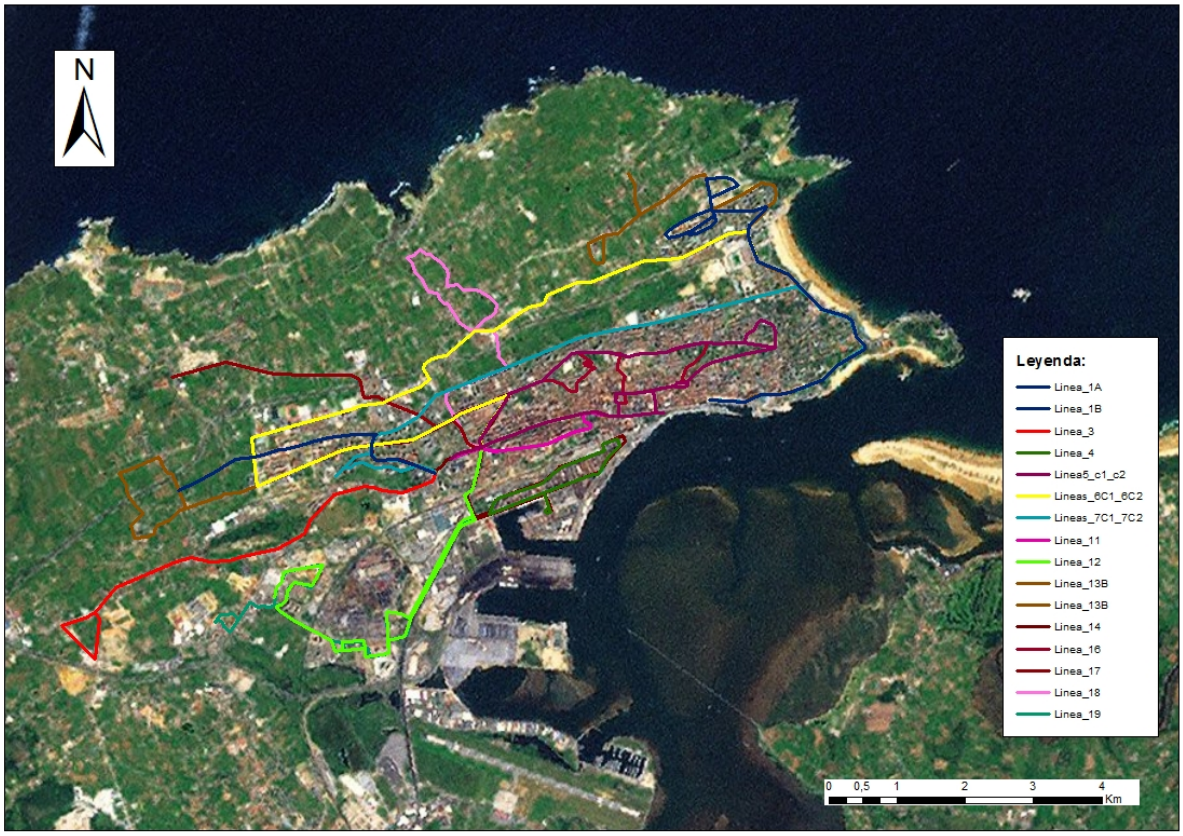


Figura 70: Mapa de las líneas (excluyendo la línea principal)

Como ya se ha explicado en el punto 7.1.4, en la situación 4 se mejoraron todavía

más las frecuencias, quedando tal y como aparecen en la figura 71.

SITUACIÓN 4																				
Líneas	**BRT**	**1A**	**1B**	**3**	**4**	**5C1**	**5C2**	**6C1**	**6C2**	**7C1**	**7C2**	**11**	**12**	**13A**	**13B**	**14**	**16**	**17**	**18**	**19**
Intervalos (min)	5	11	10	10	10	10	10	17	17	11	11	15	10	10	10	10	15	15	17	11

Figura 71: Intervalos en la situación 4 de las líneas del TUS.

7.4.1. Evaluación de los costes de explotación

Para la evaluación de los costes de operación del sistema de transportes de la ciudad, se ha empleado datos procedentes de ALSA y del TUS sobre costes de los vehículos, consumos de estos, etc. (figura 71).

	Microbús	Normal	Articulado
PLAZAS	30	90	180
COSTE FIJO (€)	16.520	27.645	33.436
CONSUMO (€/KM)	0,656	0,967	1,216

Figura 71: Costes unitarios.

Con estos datos y con los tiempos y longitudes de recorrido, con el sueldo de los conductores, etc. se estiman los costes de todas las líneas. Con el número de pasajeros, que se ha calculado en el modelo de macro simulación, se estima el volumen de pasajeros de todo el año y con eso se calculan los ingresos.

Líneas	Tipo bus	Situación Actual		
		Ingresos	Costes	Balance
L 1	**Normal**	-	1.345.160,51	- 1.345.160,51
L 2	**Normal**	-	1.428.551,05	- 1.428.551,05
L 3	**Normal**	-	782.433,38	- 782.433,38
L 4	**Normal**	-	938.437,40	- 938.437,40
L 5 C1	**Normal**	-	822.718,60	- 822.718,60
L 5 C2	**Normal**	-	843.557,97	- 843.557,97
L 6 C1	**Normal**	-	506.239,78	- 506.239,78
L 6 C2	**Normal**	-	508.281,16	- 508.281,16
L 7 C1	**Normal**	-	690.020,69	- 690.020,69
L 7 C2	**Normal**	-	774.543,23	- 774.543,23
L 11	**Normal**	-	190.957,99	- 190.957,99
L 12	**Normal**	-	584.282,70	- 584.282,70
L 13	**Normal**	-	761.859,97	- 761.859,97
L 14	**Normal**	-	431.007,00	- 431.007,00
L 16	**Microbús**	-	261.216,08	- 261.216,08
L 17	**Normal**	-	192.200,92	- 192.200,92
L 18	**Normal**	-	216.459,52	- 216.459,52
L 19	**Normal**	-	357.423,36	- 357.423,36
Refuerzo flota		-	138.225,00	- 138.225,00
SAE		-	200.000,00	- 200.000,00
Viajeros		11.400.000,00	-	11.400.000,00
TOTAL (€)		**11.400.000,00**	**11.973.576,31**	**- 573.576,31**

Figura 72: Costes de operación en la situación actual (datos NO oficiales).

Dado que en los nuevos escenarios se le va a dar mucha más importancia a los transbordos, se hace muy difícil estimar los ingresos que va a generar cada línea. Por ello, solo vamos a estimar el volumen de pasajeros de todas las líneas a la vez. Los costes los vamos a estimar como ya se ha comentado con anterioridad.

		Situación 1			Situación 3			Situación 4		
Líneas	Tipo Bus	Ingresos	Costes	Balance	Ingresos	Costes	Balance	Ingresos	Costes	Balance
BRT	Articulado	0.00	1,957.28	-1,957.28	0.00	1,957.28	-1,957.28	0.00	1,957.28	-1,957.28
L 1 A	Normal	0.00	435.90	-435.90	0.00	460.28	-460.28	0.00	646.90	-646.90
L 1 B	Normal	0.00	678.86	-678.86	0.00	708.57	-708.57	0.00	1,129.45	-1,129.45
L 3	Normal	0.00	505.30	-505.30	0.00	641.93	-641.93	0.00	951.28	-951.28
L 4	Normal	0.00	312.09	-312.09	0.00	383.81	-383.81	0.00	604.37	-604.37
L 5 C1	Normal	0.00	548.14	-548.14	0.00	661.01	-661.01	0.00	682.53	-682.53
L 5 C2	Normal	0.00	565.15	-565.15	0.00	681.76	-681.76	0.00	705.03	-705.03
L 6 C1	Normal	0.00	353.27	-353.27	0.00	650.95	-650.95	0.00	712.66	-712.66
L 6 C2	Normal	0.00	353.27	-353.27	0.00	650.95	-650.95	0.00	712.66	-712.66
L 7 C1	Normal	0.00	522.91	-522.91	0.00	647.63	-647.63	0.00	912.46	-912.46
L 7 C2	Normal	0.00	356.09	-356.09	0.00	642.32	-642.32	0.00	904.52	-904.52
L 11	Normal	0.00	192.35	-192.35	0.00	365.79	-365.79	0.00	407.74	-407.74
L 12	Normal	0.00	450.40	-450.40	0.00	906.32	-906.32	0.00	1,384.98	-1,384.98
L 13 A	Normal	0.00	284.10	-284.10	0.00	626.46	-626.46	0.00	888.68	-888.68
L 13 B	Normal	0.00	450.40	-450.40	0.00	906.32	-906.32	0.00	1,362.45	-1,362.45
L 14	Normal	0.00	296.51	-296.51	0.00	628.96	-628.96	0.00	892.49	-892.49
L 16	Micro	0.00	214.08	-214.08	0.00	322.31	-322.31	0.00	362.29	-362.29
L 17	Normal	0.00	185.54	-185.54	0.00	595.77	-595.77	0.00	595.77	-595.77
L 18	Normal	0.00	216.46	-216.46	0.00	636.85	-636.85	0.00	696.72	-696.72
L 19	Normal	0.00	356.09	-356.09	0.00	971.88	-971.88	0.00	1,408.19	-1,408.19
Refuerzo flota		0.00	67.41	-67.41	0.00	205.10	-205.10	0.00	232.74	-232.74
SAE		0.00	200.00	-200.00	0.00	200.00	-200.00	0.00	200.00	-200.00
Amortización Costes Implantación		0.00	500.00	-500.00	0.00	680.60	-680.60	0.00	694.60	-694.60
Viajeros		12,540.00	0.00	12,540.00	18,240.00	0.00	18,240.00	19,380.00	0.00	19,380.00
TOTAL (M€)		12,540.00	10,001.59	2,538.41	18,240.00	15,132.87	3,107.13	19,380.00	19,045.79	**334.21**

Figura 72: Costes de operación en las nuevas situaciones.

8. COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS FÉRREOS Y EL BRT

Actualmente existen muchos estudios en los que se comparan ambos sistemas, como es el caso de Pardo, C. F. (2009).

"Uno de los temas principales de debate entre profesionales de transporte público es aquél donde se discuten los argumentos a favor y en contra de una tecnología sobre otra, y más específicamente los sistemas férreos en contraposición al Bus Rápido. En estas discusiones se encuentran argumentos tanto técnicos como ideológicos, y en muchas ocasiones los argumentos técnicos parecen tener un tinte de parcialización hacia la favorabilidad aparente de un sistema u otro. Los argumentos incluyen:

- **Capacidad de los sistemas (pasajeros / hora / sentido):** normalmente se afirma que los sistemas férreos tienen mayor capacidad que los sistemas basados en buses. Al realizar un análisis de las capacidades teóricas de los sistemas, esto es verdad. No obstante, al hacer un análisis en cada caso y para cada corredor, esta afirmación pierde fuerza pues la capacidad de ambos sistemas es mayor o menor a lo esperado teóricamente. Por ejemplo, aunque el sistema BRT de Bogotá se estimaba con una capacidad de alrededor de 20.000 pphpd, al implementarse esta capacidad ascendió hasta 35.000. De otra parte, aunque la capacidad teórica de un metro subterráneo es de 80.000 pphpd (la capacidad máxima del metro de Hong Kong), la línea D de Buenos Aires asciende únicamente a 20.000 pphpd. Existen otros ejemplos como el del monorriel de Kuala Lumpur cuya capacidad real es de 3.000 pphpd. Es claro que la capacidad teórica no es una medida válida para determinar si un sistema es superior a otro, como tampoco lo es la utilización de ejemplos de otras ciudades. El mejor análisis es aquél que determina la demanda real de un corredor y determina la mejor opción.
- **Sostenibilidad del sistema a largo plazo:** los grupos que no apoyan los sistemas férreos dan una visión del sistema donde se presentan problemas de financiación a largo plazo del sistema, los cuales endeudan a un país y pueden generar un problema de subsidio recurrente para la operación del sistema.

Quienes no apoyan el BRT hacen la crítica de la vicia útil de los vehículos y la fragilidad de los materiales de construcción de las troncales.

- **Tiempo de construcción:** Se han presentado argumentos donde los sistemas férreos parecen durar 10 veces más en su construcción que los sistemas de tipo BRT. Esto en parte debido a la incertidumbre sobre las dificultades de excavación en la etapa de planificación de un sistema subterráneo, que no son tan altas en la planificación de un BRT.
- **Costos capitales:** El costo capital de un sistema siempre parte de una estimación, la cual puede cambiar según varios factores. Esto sucede tanto para sistemas férreos como BRT. No obstante, se han presentado argumentos que apoyan el BRT, pues los costos de un sistema férreo pueden presentar mayores desviaciones al ser el costo inicial estimado mucho más elevado que el del BRT.
- **Necesidad de subsidio para operación:** según las experiencias de los sistemas férreos y los BRT. los subsidios de operación sí son necesarios para la operación del sistema férreo, mientras que éstos no lo son para un sistema tipo BRT. El argumento principal para apoyar el BRT es que se liberan subsidios que podrían ser utilizados en otros sectores (salud. educación, etc.), lo cual es necesario en países en desarrollo (a diferencia de la situación de países europeos, donde el subsidio de transporte no necesariamente impide un subsidio en otro sector).
- **Trabajo local o extranjero en el desarrollo y operación del sistema:** Se argumenta que los sistemas BRT hacen mayor uso de la industria y el empleo local al desarrollar un sistema tipo férreo. Esto también se relaciona con la integración de operadores existentes al nuevo sistema, lo cual no es muy común en sistemas férreos en América Latina.
- **Uso de espacio en superficie:** Se afirma que el derecho de vía necesario para un sistema BRT es mucho mayor al necesario para el desarrollo de un sistema férreo subterráneo, elevado o incluso en superficie.

Un inconveniente primordial cuando se parcializan las discusiones con los factores

específicos, es que no se analizan en su conjunto sino de manera aislada. Es decir, cada argumento tiene sus propias razones que no se conjugan con las características de una ciudad especifica ni con los promotores de los dos tipos de transporte público, en algunas ocasiones lideradas por académicos, otras por consultores, otras por quienes desarrollan una u otra tecnología, y algunos de los casos son liderados por políticos (con o sin conocimiento profundo del sistema que promueven).

Lo importante aquí es el hecho de que exista esta riña entre dos tipos de sistemas de transporte público no es fructífera para el sector, pues se diluye la relevancia de mejorar el transporte público y se resalta el desacuerdo entre profesionales sobre qué sistema es más eficiente, limpio, de bajo costo u otra característica que, según quien la presente, se muestra más favorable hacia un sistema u otro.

Un ejemplo del argumento a favor de una tecnología u otra con base en los costos de construcción es claro: en unos casos, los promotores del Bus Rápido argumentan que los costos del sistema pueden ser tan bajos como 0,5 millones de dólares por kilómetro, mientras que los promotores de las alternativas férreas argumentan que los valores reales de la construcción de un sistema BRT son de 15 millones de dólares por kilómetro. En los dos casos se están tomando valores extremos en circunstancias particulares (el primero, la infraestructura de muy bajo costo de Quito, y en el segundo del sistema de Bogotá que incluye los costos de expropiación de terrenos y la expansión de vías para automóviles y banquetas). Ello también se complementa con los costos capitales anunciados de los sistemas férreos, que de la boca de quienes los promueven parecen ser tan bajos como los 15 millones (el valor que ellos adjudican a cualquier BRT) y para quienes promueven el BRT son de “hasta 300 millones de dólares por kilómetro” (otra exageración, de una línea de metro de Londres que tuvo complicaciones en su construcción). Hay innumerables ejemplos, como el presentado antes, en relación con los otros factores mencionados arriba. De particular importancia son los casos de Quito y Bogotá, donde se han encontrado dificultades de decisión frente a los siguientes pasos en la mejoría de los sistemas existentes de transporte público debido a la confusión sobre los parámetros reales de los sistemas BRT y férreos, y las discusiones entre técnicos que han llegado a niveles internacionales de discusión.

Esta "lucha" entre tecnologías de transporte público no es fructífera para ninguna de las partes. Mientras los promotores de distintas tecnologías de transporte público no están de acuerdo sobre valores básicos de sus productos, las ciudades pierden entusiasmo hacia el transporte público y tal vez prefieren invertir en infraestructura para transporte privado que, como se mencionó arriba, presta un servicio limitado e ineficiente a una proporción muy baja de la población, especialmente en ciudades en desarrollo. Es imprescindible dejar de lado esta confusión entre promotores de tecnologías y acordar parámetros básicos de presentación de alternativas y de elección para cada ciudad en particular. Ningún sistema de transporte masivo es perfecto para todos los casos, ya sea basado en buses, trenes subterráneos o elevados o tranvías. Las decisiones sobre un sistema de transporte público se deben tomar con base en consensos y en informaciones imparciales y coherentes, y en el apoyo mutuo entre partes involucradas.

Una posible solución al problema sería la realización de estudios de prefactibilidad y análisis de alterativas como una herramienta imparcial que podría generar soluciones. No obstante, es importante anotar también que la aplicación de los estudios debe ser realizada por organizaciones o personas que no están promoviendo activamente una u otra tecnología, dado que en muchos casos son los mismos promotores de una tecnología quienes "demuestran" que esta tecnología es factible de desarrollar en una ciudad. Esta contradicción debe ser resuelta por medio de la aplicación de estos estudios por parte de otras organizaciones no involucradas en la venta o compra de tales sistemas, siendo tal vez el ideal una organización supranacional cuya competencia incluya el transporte urbano. Los datos que se recojan en estos estudios y la situación financiera y política de una ciudad determinarán el sistema que mejor se ajuste a estos casos.”

Para concluir con la comparación, os presento una tabla en la que se comparan tres de los sistemas de transporte masivo más importantes, como son: el tranvía, el metro y el BRT. En la tabla aparecen algunas de las principales características que mejor definen estos sistemas como la velocidad comercial, la capacidad, la velocidad máxima, los costos de inversión…

Características	Tranvía	Metro	BRT	BHLS-Santander
Capacidad (pasajeros/vehículo)	110-250	140-280	80-160	180
Vehículos/unidad	1-4	1-10	1	1
Velocidad máxima (km/h)	60-80	70-100	60-70	50*
Velocidad comercial(km/h)	15-35	25-55	15-30	18,7
Frecuencia máxima (unidades/h)	40	20-40	70-210	12
Capacidad (pasajeros/h/sentido)	6.000-20.000	10.000-72.000	11.000-40.000	2160
Costos de inversión (Millones €/km)	15-50	30-200	1-10	0,12

*La velocidad máxima permitida en la zona es de 50km/h.

Figura 73: Tabla comparativa de los diferentes tipos de transporte masivo.

9. CONCLUSIONES

En este Proyecto se ha propuesto un sistema de transporte público tronco-alimentado para la ciudad de Santander, que consigue explotar la estructura lineal de la ciudad y permite mejorar los tiempos de viaje de los usuarios.

El sistema de transporte propuesto no es un sistema BRT al uso, ya que hay determinadas medidas propias de los sistemas BRT que no se han empleado, como por ejemplo, la construcción de terminales en todas las paradas. Por ello, este sistema está quizá más próximo a los conocidos BHLS, es decir, un BRT sin la totalidad de las características que lo definen.

Para el diseño y análisis de operación del sistema, se ha calibrado un modelo de simulación sobre el que poder modelizar todas las medidas propuestas, su influencia sobre el tráfico, y la determinación de tiempos de operación y de viaje de los usuarios.

De todos los escenarios simulados, el que mejores resultados ha obtenido ha sido el denominado “Situación 4”. En este escenario se proponen las siguientes medidas de actuación:

- Eje troncal entre Valdecilla y los Campos de Sport del Sardinero con Carril bus-taxi en cada sentido.
- Buses articulados en el eje troncal y estándar en las líneas alimentadoras: líneas de conexión de los barrios y zonas periféricas con el eje troncal.
- Intervalos en el eje troncal de 5 minutos.
- Intervalos en las alimentadoras alrededor de 10 minutos.
- Priorización semafórica en el Paseo de Pereda.
- Aumento de capacidad de las paradas para permitir la operación simultánea de dos buses.

Los servicios propuestos se han diseñado con los siguientes intervalos:

LINEAS	f_hp	f_hv	f_sab	f_fest
BRT	5	5	10	10
L 1 Alisal	11	11	15	15
L 1 Valdenoja	10	10	15	15
L 3	10	10	15	15
L 4	10	10	15	15
L 5 C1	10	10	15	15
L 5 C2	10	10	15	15
L 6 C1	17	17	15	15
L 6 C2	17	17	15	15
L 7 C1	11	11	15	15
L 7 C2	11	11	15	15
L 11	15	15	15	15
L 12	10	10	15	15
L 13 Lluja	10	10	15	15
L 13 Cueto	10	10	15	15
L 14	10	10	15	15
L 16	15	15	15	15
L 17	15	15		
L 18	17	17	15	15
L 19	11	11	15	15

Con estas medidas se obtiene un mayor volumen de pasajeros captados (un 70% más de pasajeros en la hora punta, que en la situación actual), menores tiempos de espera y viaje en toda la ciudad y, además, no genera pérdidas. A pesar de que las situaciones 1 y 3 generan muchos más beneficios que la situación 4, se entiende que la finalidad de un sistema de transporte público no es generar beneficios, si no dar el mejor servicio posible a los ciudadanos.

De esta forma, cuando el coste de inversión de un sistema BRT se estima entre 1 y 10 millones de € por kilómetro, en el sistema propuesto el coste es de 0,12 millones de €/km, es decir, es entre 10 y 100 veces menor.

Este ahorro es todavía mayor si se compara con el servicio equivalente ofrecido con un sistema LRT o Tranvía, consiguiéndose el mismo nivel de servicio con costes de entre 150 y 500 veces inferior.

A continuación se detallan las características operacionales del servicio propuesto:

Variable	Valor
Nº buses	9 articulados; 61 estándar; 3 micro
Viajeros / año	32,300,000
Ingresos / año	19,380,000 €
Coste operación / año	19,045,790 €
Km servicio / año	5847177 km
Horas servicio / año	326610.8 h
Velocidad comercial	17.9 km/h
Velocidad comercial troncal	18.7 km/h
Coste /km	3.25 €/km
Personal necesario	190 trabajadores

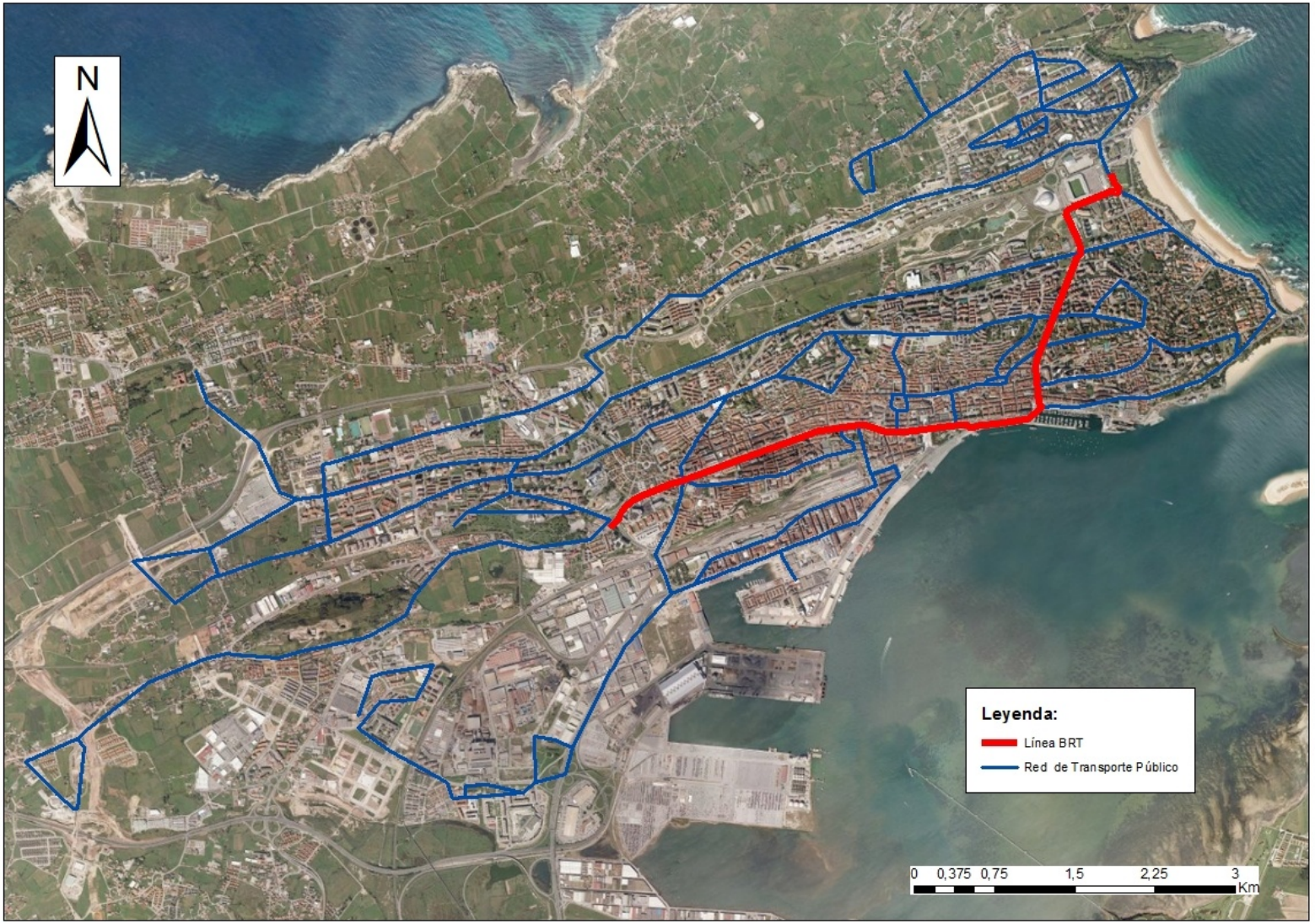


Figura 74: Mapa de la línea troncal y de las líneas alimentadoras.

10. REFERENCIAS

Andreasson I. (1978) Interactive planning using computers. Proceedings of an International Conference and Exhibition on Public Transport System in Urban Areas, Goteborg, Sweden, June 1978.

Andreasson I. (1980) New interactive computer methods for public transport analysis. *Proceedings of the PTRC Summer Annual Meeting*, University of Warwick.

Bursey N., McCallun D., Macbriar I. y K. Mills (1979) The national bus company 'MAP' market analysis project: 3. System design, *Traffic Engineering and Control* n.20.

Constinett P. J. (1970) Transportation study models in public transport. *Proceedings of a PTRC Symposium on public road transport analysis*, London.

CTP (Confederation of British Road Passenger Transport) (1981), Urban planning and design for road public transport, CTP, London.Daly (1973)

Department of the Environment and Welsh Office (1973) Bus operation in residential and industrial areas. Joint circular n.82/73.

Di Gangi M., B. Montella (1995). Progetto di una rete di trasporto collettivo mediante indicatori di prestazione. In Metodi e modelli per la pianificazione e la gestione dei sistemi di trasporto collettivo a cura di Nuzzolo A. e Russo F., pp.13-51, Franco Angeli Editore.

Faulks R. W. (1981) *Urban and rural transport*. Ina Allan, London.

Fernández, R. (2001a) Modelling bus stop interactions, *PhD Thesis*, University of London (Sin publicar)

Femández, R. y Tyler, N. (1999). Design of bus stops as part of bus priorities. *Proceedings of the European Transport Conference 1999. Seminar D: Traffic Management, Safety and ITS*, PTRC, London.

Fernández, R., Cortes C., y Burgos, V. (2007) Resultados de la modelación microscópica de interacciones vehículos-pasajeros-tráfico para el diseño de sistemas BRT. *XIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, Santiago, October. Chile.

Giannopoulos, G.A., (1990). *"Bus Planning and Operation in Urban Areas: A Practical Guide"*. Avebury, Gower Pub. Co. Ltd., UK.

Giannopoulos (1989)

Gibson, J. y Fernández, R. (1995) Recomendaciones para el diseño de paraderos de buses de alta capacidad. *Apuntes de ingeniería* 18, pp. 35-50.

Gibson, J., Baeza y Willumsen, L.G., (1989) Bus-stops, congestion and congested bus-stops. *Traffic Eng. Control* 30, 291-302.

Greater Glasgow Passenger Transport Executive and the Strathcycle Regional Council (1975)

Hasselstrom D., I.D. Harris (1980) Experience of a computerised method for improving urban route networks. *Proceedings of a Seminar on Public Transport Operations Research*, University of Leeds.

Hsu J., V.H. Surti (1975) Framework of route-selection in bus network design. *Transportation Research Record 546*.

Hsu J., V.H. Surti (1977) Decomposition approach to bus network design. *Transportation Engineering Journal ASCE,* n. 13.

Ibeas, A., Moura, J. L., Dell'Olio, L., y Ortuzar J. de D., (2006). Costing School Transport in Spain. *Transportation Planning And Technology*, 29 (6), pp. 483-501.

Ibeas, A., Moura, J. L. y dell'Olio, L. (2007). Modelo de Movilidad de la ciudad de Santander. Documento de trabajo. Universidad de Cantabria.

Larrain, H. y Muñoz, J.C. (2008) Public transit corridor assignment assuming congestion due to passenger boarding and alighting. *Netw. Spat. Econ*. 8, 241–256.

Last A., S.E. Leak (1976) TRANSEPT: a bus model. *Traffic Engineering and Control* n.l7.

London Transport (1976) South east London bus study, report of the Steering Group, Greater London Council and London Transport Executive, London.

Molinero, Á.R., (1996) *Transporte público: planeación, diseño, operación y administración.* Ed. Quinta del Agua , S. A. de C. V. México.

O'Brien W.B. (1974) An example of the functional design and costing of transit routes. In J.H. Shortreed (ed.), *Urban Bus Transit - a Planning Guide,* University of Waterloo, Canada.

Pardo, C. F. (2009). "Los cambios en los sistemas integrados de transporte en las principales ciudades de América Latina". Publicación de las Naciones Unidas. Pág. 23 – pág. 25.

Pratt R. H., G.W. Schultz (1972) A systems approach to sub-area transit service design. *Transportation Research Record* n.419.

Rapp M.H. (1972a) Man-machine interactive transit system planning. *Socio-economic Planning Sciences* n.6.

Rapp M.H. (1972b) Transit system planning: a man-computer interactive graphic approach", *Highway Research Record* n.415.

Rapp M.H., G.D. Gehner (1973) Criteria for bus rapid transit systems in urban corridors; some experiments with interactive graphic design system. *Highway Research Record* n.455.

Rapp. M.H., G.D. Gehner (1976) Transfer optimisation to minimise delays: Stage II of an interactive graphic system for operational transit planning. *Transportation Research Record* n.619.

Rapp M. H., P. Mattemberger (1977) Operational urban public transport planning approaches and applications. *Proceedings of the 3rd WCTR*, The Hague, Nederlands.

Russo F., et al. (2002) *Modelli e metodi per la programmazione dei servizi di trasporto pubblico locale: uno stato dell'arte. Franco Angeli Editore***.**

Schneider J. D., J.W. Clark (1976) High performance bus rapid transit systems: a design process experiment. *Transportation Research Record* n.606.

Schneider J.B., Gehner C.D., Porter D, J.W. Clark (1974) Computer aided design of urban transit systems. *Transportation Engineering Journal*, November.

Schneider J. B., D. Porter (1974) Assessing the utility of an interactive graphic computer system: a transportation system design process. *Transportation Research Record* n.491.

TRB (1980) *Bus route and schedule planning guidelines*. Synthesis of highway practice 69, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington DC, U.S.A.

Transportation Research Board (TRB). (2000). "Highway capacity manual." Transportation Research Circular–Special Rep. 209, Washington, D.C.

Transportation Research Board (2003) Transit Capacity and Quality of Service. TCRP report 100, Washington D.C.

Voorhes A.M. and Associates (1969) *A system analysis of transit routes and schedules*, NTISPB 189 269, U.S.A.

WMTPE (1981) *Business development action plans, standards and procedures: No. I. Methodology for Service Network Development*. West Midland Passenger Transport Executive, Birmingham.