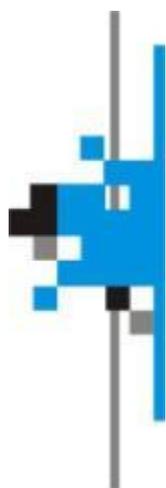

ARTÍCULO

Daniel González
Adriana Olivares
Fernando Córdova
Marco De Paolini

MODELO CONCEPTUAL PARA LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PRT/GRT AUTOTRÉN. EJEMPLIFICACIÓN EN UN PARQUE TEMÁTICO

Revista Transporte y Territorio N° 8, Universidad de Buenos Aires, 1º sem. de 2013.



Revista Transporte y Territorio

ISSN 1852-7175

www.rtt.filo.uba.ar

Programa Transporte y Territorio

Instituto de Geografía

Facultad de Filosofía y Letras

Universidad de Buenos Aires



Cómo citar este artículo:

GONZÁLEZ, Daniel; OLIVARES, Adriana; CÓRDOVA, Fernando y DE PAOLINI, Marco. 2013. Modelo conceptual para la aplicación de la tecnología PRT/GRT autotrén. Ejemplificación en un parque temático. *Revista Transporte y Territorio N° 8, Universidad de Buenos Aires*. pp. 65-99. <www.rtt.filo.uba.ar/RTT00805065.pdf>

*Recibido: 22 de octubre de 2012
Aceptado: 2 de mayo de 2013*



Modelo conceptual para la aplicación de la tecnología PRT/GRT autotrén. Ejemplificación en un parque temático

Daniel González¹
Adriana I. Olivares²
Fernando Córdova³
Marco De Paolini⁴

RESUMEN

Este artículo tiene el objetivo de documentar, mediante un modelo conceptual, los procesos para la aplicación del sistema de movilidad PRT/GRT, denominado Autotrén, cuya tecnología está desarrollada en México y contiene adaptaciones especiales para el contexto latinoamericano. Este sistema está siendo desarrollado por el Consorcio Alianza Estratégica y Red de Innovación para Transporte Urbano Sustentable (AERI) y ha recibido financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para su desarrollo tecnológico. En el año 2011 la Universidad de Guadalajara se integró al Consorcio AERI y realizó un anteproyecto de aplicación del Autotrén para el Zoológico Guadalajara, en el que participamos los autores, que permitió establecer un conjunto de procesos técnicos y criterios de diseño, que se documentan en este artículo y se ejemplifican con la aplicación mencionada. En cada proceso del modelo conceptual, se integran criterios para la aplicación tanto en parques temáticos, sustentados en la aplicación realizada, como en áreas urbanas, los cuales será necesario poner a prueba mediante una aplicación específica prevista para el año 2013.

Conceptual model for the implementation of the PRT / GRT lorry convoy. Exemplification at a theme park

ABSTRACT

This article aims to document the methodological process used to design a PRT/GRT system for use in theme parks. The case of study is based on the Autotrén technology, which uses special adaptations for Latin American context. This system is being developed in Mexico by the Strategic Alliance Consortium and Innovation Network for Sustainable Urban Transport (AERI) and has been funded by the National Council of Science and Technology (CONACYT) for its technological development. In 2011 the University of Guadalajara joined the AERI Consortium and made a preliminary study for the implementation of Autotrén system in the Guadalajara Zoo, which defined a set of technical processes and recommendations that are documented in this article. Each process of the conceptual model integrates criteria for both the implementation in theme parks and in urban areas.

Palabras Clave: Transporte rápido personal; Procesos; Zoológico; Ciudad; Transporte.

Palavras-chave: Transporte rápido pessoal; Processos; Zoo; Cidade; Transporte.

Keywords: Personal rapid transit; Process; Zoo; City; Transport.

1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo pretende documentar la aplicación y analizar las potencialidades de un sistema de transporte novedoso en América Latina denominado en un primer momento LINT (Lean Intelligent Network Transportation), actualmente Autotrén, cuya tecnología está siendo

¹ Centro de Investigaciones del Medio Ambiente y Ordenación Territorial (CIMA), Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, Universidad de Guadalajara, México – dgonzarler@gmail.com

² Centro de Investigaciones del Medio Ambiente y Ordenación Territorial (CIMA), Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, Universidad de Guadalajara, México – olivares.adriana@gmail.com

³ Laboratorio de Experimentación de Materiales y Procesos, Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, Universidad de Guadalajara, México – cordova_fernando@hotmail.com

⁴ Centro de Investigaciones del Medio Ambiente y Ordenación Territorial (CIMA), Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, Universidad de Guadalajara, México – marco.depaolini@gmail.com



desarrollada en México a partir de los sistemas Personal Rapid Transit (PRT) y Group Rapid Transit (GRT).

Con este objetivo, se integró el Consorcio Alianza Estratégica y Red de Innovación para Sistemas Avanzados de Transporte Urbano Sustentable (AERI), el cual integra empresas, universidades y organizaciones civiles de México, así como asesores reconocidos de México y Europa. Desde el año 2011 la Universidad de Guadalajara forma parte de dicho consorcio contribuyendo en la elaboración de diversos proyectos bajo la coordinación de los autores de este artículo e integrando estudiantes del Doctorado en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad y de la Maestría en Procesos para la Proyección Arquitectónica – Urbana.

Los sistemas PRT y GRT, como lo detallamos más adelante, cuentan con un largo periodo de desarrollo en Estados Unidos y Europa, con aplicaciones orientadas a resolver diversos problemas y escalas de movilidad, sin embargo, todavía son escasas y recientes las aplicaciones exitosas en términos de su aceptación, permanencia y explotación comercial. En América Latina estos sistemas han sido considerados en los últimos años para su aplicación en México y algunas ciudades de Brasil como Teresina donde, según fuentes no oficiales, se planeaba realizar un proyecto piloto en 2012 del cual no se tiene actualmente información (PRT Consulting, 2011).

Por su tamaño, costo y versatilidad, entre otras características; los sistemas PRT y GRT han sido considerados, desde sus primeros desarrollos, como una alternativa al vehículo motorizado privado. Esta constituye de partida una condición interesante para las ciudades de los denominados “países en vías de desarrollo”, donde se observa un importante incremento de la movilidad la cual se ha sustentado fundamentalmente en el vehículo motorizado a tal grado, que su propiedad y uso está creciendo aún más rápido que la población, las velocidades de viaje están disminuyendo y se está deteriorando el ambiente para los viajes a pie y en transportes no motorizados como la bicicleta (Banco Mundial, 2002). La flexibilidad de los sistemas PRT y GRT para la conexión multimodal es también un factor relevante considerando que diversos especialistas han planteado que la interconexión de sistemas diferentes de movilidad es clave para la constitución de un sistema integrado que contribuya a la sostenibilidad (Miralles, 2011; Szyliowicz, 2003).

Las grandes ciudades de América Latina, en este sentido, tienen entre sus más importantes desafíos plantear nuevos sistemas y estrategias de movilidad que contribuyan a la construcción de hábitats ambiental y socialmente sostenibles. Según datos del Banco Mundial, la velocidad promedio de viaje en un día hábil de la Ciudad de México puede ser de 10 km/h y en San Pablo, Brasil de hasta 15 km/h; se han registrado incrementos en los costos de operación del transporte público debido a la congestión en ciudades como Río de Janeiro en 10% y en San Pablo del 26%; todo esto a pesar de que la motorización aún se encuentra en proceso de expansión (Banco Mundial, 2002). Asimismo, en México y otras ciudades del continente, la seguridad personal ha pasado a ser un factor relevante que condiciona en el imaginario de los sectores medios el anhelo y necesidad de contar con un automóvil como medio de movilidad en vez de hacer uso del transporte público, cuyo servicio es todavía deficiente (Marmolejo, C., 2011; Olivares et al., 2011).

El Autotrén presenta aspectos técnicos y funcionales que le dan flexibilidad para resolver diversos problemas de movilidad en espacios físicamente acotados como parques temáticos, campus universitarios y parques industriales. A partir de la aplicación implementada en el ZG es posible establecer un mapa general de procesos y criterios técnicos que apoyen su implementación para resolver dichos problemas de movilidad, con acotaciones específicas de acuerdo con el nivel y complejidad de cada aplicación. Sus características técnicas, analizadas en cada proceso, dan la posibilidad de proponerlo como aplicación experimental, para resolver ciertas demandas de movilidad en las ciudades.



Si bien la aplicación experimental del Autotrén se realizó en un parque temático, el Zoológico Guadalajara, la principal aportación de este trabajo ha constituido la definición de los procesos clave tanto para aplicaciones urbanas como turísticas, y la simulación de su funcionamiento, lo cual nos permitió evaluar algunas de sus posibilidades para resolver problemas de movilidad urbana, con la intención de realizar, en una segunda fase, una aplicación de este tipo.

El documento que presentamos se estructura en tres partes. La primera presenta un resumen del estado en el que se encuentra el desarrollo de los sistemas PRT y GRT en el mundo, que comprende: estudios técnicos, reflexiones teóricas, proyectos y aplicaciones en funcionamiento. En la segunda parte se definen y analizan los procesos clave considerados para la aplicación del sistema Autotrén, tanto en aplicaciones urbanas como en parques temáticos, ejemplificando con una aplicación de pequeña escala y complejidad como es el parque temático Zoológico Guadalajara. En la tercera y última parte, se presentan las conclusiones respecto de los procesos identificados para la aplicación de sistemas PRT/GRT en parques temáticos y su traslación para aplicaciones urbanas; asimismo se establecen algunas razones para su consideración como un sistema de factible aplicación en México y América Latina.

2. ANTECEDENTES DESTACADOS Y SITUACIÓN ACTUAL DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE PRT y GRT

El concepto “Personal Rapid Transit” denominado por sus iniciales PRT, ha sido utilizado, según Anderson, para hacer referencia a cualquier sistema Automated Guideway Transit (AGT), sin considerar el tipo o tamaño de la aplicación (Anderson, 2000:3-29). En los últimos años estos sistemas han sido integrados a la clasificación de Automated People Mover System.

Si bien diversos autores, equiparan en términos generales los sistemas AGT con un sistema automatizado de taxis, es necesario realizar algunas precisiones relativas a sus aspectos operativos, con la finalidad de tener claridad respecto de las características de este sistema de transporte.

- El diseño del vehículo puede tener capacidades pequeñas: de 3-6 pasajeros sentados (PRT); hasta 20 pasajeros parados y sentados (GRT).
- Los vehículos se desplazan a través de una red de carriles exclusivos a nivel de piso, elevados o subterráneos. Por las características de los vehículos la vía es esbelta y requiere poca disponibilidad de espacio, por lo que su aplicación es menos agresiva con el contexto que otros sistemas.
- Los vehículos son automatizados y no requieren de conductor.
- Las estaciones, por lo general, están instaladas fuera de la guía (“off line”) permitiendo el flujo continuo de vehículos en la red.
- El traslado de pasajeros puede ser programado desde la estación de origen a la de destino, dependiendo de la modalidad del sistema: sin paradas intermedias para PRT y con paradas intermedias –por demanda- para GRT.
- Dependiendo de la modalidad del sistema los pasajeros puede encontrar vehículos disponibles para uso inmediato en modalidad PRT o deberán esperar en la estación de origen en modalidad GRT.
- Es posible programar la capacidad de la red de acuerdo con la demanda disminuyendo el tiempo entre vehículos (entre 3 segundos y en algunos casos hasta 0.25 segundos).
- Su velocidad puede ser programa de acuerdo con las características del desarrollo tecnológico y de su aplicación entre 15 y 40 km/h, sin embargo, hay algunos que pueden alcanzar hasta 70km/h (Vectus, 2010).



- Cuenta con diversos sistemas de propulsión. Los desarrollos más innovadores cuentan con energía eléctrica renovable sin emisiones al ambiente.

2.1 Estudios pioneros y recientes

El concepto Personal Rapid Transit (PRT) es atribuido por Anderson (2000) a Don Fitcher y Ed Haltom quienes, de manera independiente, establecieron desde 1953 los atributos clave del sistema: pequeños vehículos completamente automatizados, que trasladan a la gente a su destino sin paradas intermedias, mediante una red de carriles exclusivos (2000:3-29).

Entre los primeros, más amplios y documentados estudios sobre sistemas PRT, está el realizado por la Aeroscape Corporation entre 1968 y 1976, como resultado de su decisión de orientar la tecnología aeroespacial para resolver problemas urbanos y de tomar el PRT como sistema receptor de la misma. Los resultados del programa fueron registrados en la publicación "Fundamentals of Personal Rapid Transit" de Jack H. Irving, reconocida como uno de los primeros documentos que detallan las características de este tipo de sistemas de transporte (Department of Transportation Bureau of Reserch New Jersey, 2007).

Asimismo, entre 1971 y 1975 se llevaron a cabo en Estados Unidos, tres conferencias especializadas en el análisis de los sistemas PRT impulsadas por Edward Anderson: la primera, realizada en Minneapolis, Minnesota en 1971, fue dirigida a especialistas nacionales, mientras que las siguientes, realizadas en 1973 y 1975, ampliaron su cobertura hacia el nivel internacional. Como resultado de cada conferencia se elaboró un reporte editado un año después de cada evento. Los correspondientes a las conferencias de 1973 y 1975 se centraron en los avances y problemas de los sistemas PRT, así como en su potencial como nueva forma de transporte público.

En 1977 el Departamento de Transporte de los Estados Unidos desarrolló un reporte que sintetizó las propuestas enviadas por los gobiernos de 38 ciudades de ese país, a partir de desarrollos AGT que incluían: Single Line Transit (SLT), Group Rapid Transit (GRT) y Personal Rapid Transit (PRT). El objetivo era demostrar el potencial de estos sistemas en los proyectos denominados Downtown People Mover (DPM), promovidos para la revitalización de los distritos centrales de negocios (CBDs) por el AGT Socio-Economic Research Program del Urban Mass Transportation Administration (Department of Transportation USA, 1977).

En la última década se han desarrollado un importante número de estudios técnicos y reflexiones sobre los sistemas PRT, sobre todo GRT, algunos de los cuales se han analizado ya que nos dan evidencias de su lugar en el escenario de los desarrollos tecnológicos de transporte público.

Edward Anderson es uno de los especialistas en sistemas PRT más prolíficos y reconocidos por las aportaciones que ha realizado para su desarrollo desde 1968. Fue el organizador de las tres conferencias que se llevaron a cabo en sistemas PRT entre 1971 y 1975. Desde 2005 es consultor en sistema PRT a través de su empresa PRT International. Destacan sus aportaciones relativas al estudio de los aspectos técnicos del sistema y sus reflexiones sobre las ventajas de la aplicación de sistemas PRT en áreas urbanas (Anderson, 2000:3-29).

Destaca en Europa Ingmar Andreásson integrante del Centre for Traffic Research (Real Instituto de Tecnología de Suecia) y Göran Tegner (WSP Group), especialistas y asesores en sistemas PRT, quienes cuentan con un buen número de estudios técnicos y artículos científicos sobre estos sistemas. Entre sus más recientes aportaciones, en coautoría con otros especialistas, destaca el análisis de los proyectos que se han desarrollado para la implementación de sistemas PRT en Suecia, incluyendo las causas que han impedido su



implementación (Tegner et al., 2007); el estudio técnico para mejorar el sistema de transporte de la ciudad de Huddinge en Suecia, a través de sistemas PRT, realizado para la Comisión Europea a través del programa EDICT (Tegner et al., 2001).

Específicamente Andréasson ha desarrollado estudios técnicos orientados al análisis y mejora de la capacidad y velocidad de los sistemas PRT, a través del software de simulación PRT Sim desarrollado por él mismo (Andréasson, 2009); asimismo realizó un análisis técnico comparativo de sistemas de movilidad de pequeña escala que podrían ayudar a disminuir el uso de automóvil privado, que incluyó el PRT, minibuses sin conductor, sistemas de propulsión por cable, de modo dual y bandas transportadoras (Andréasson, 2001).

Otras aportaciones recientes significativas para el estudio de los sistemas GRT/PRT son las siguientes: el estudio técnico en el que se exploran las potencialidades de los sistemas PRT para resolver las necesidades de transporte en New Jersey. (Department of Transportation Bureau of Reserch; NJ Transit. 2007) y el estudio de simulación de tráfico en el aeropuerto de Hethrow, que consideró la integración de las Terminales 1 y 3 al sistema PRT que actualmente se encuentran funcionando que vincula la Terminal 5 y el estacionamiento, en el que se demostró, mediante un modelo de simulación Hermes, una significativa disminución en el tiempo medio de espera a partir de métodos de gestión de la demanda (Pengjun, Jeffery y Mcdonald, 2009). Desde otra visión disciplinar destaca el análisis de los sistemas PRT desde la percepción estética del paisaje, entre cuyos resultados sobresale que, la posibilidad de integración al contexto del sistema PRT es más relevante que sus propios atributos estéticos (Bernasconi et al., 2009).

2.2 Desarrollos tecnológicos

Los desarrollos tecnológicos con sistemas PRT han evolucionado a lo largo de más de 40 años, dejando un importante bagaje de experiencias con aplicaciones particulares que muestran su versatilidad para resolver problemas diversos de movilidad. A continuación se enumeran las experiencias más documentadas, con el objetivo de establecer la evolución de este tipo de sistemas de transporte.

En 1969 dos compañías alemanas, Meserschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) y Mannesmann Demag, que tenían en desarrollo de manera independiente sistemas PRT, fueron convocadas por el gobierno alemán para el desarrollo conjunto del proyecto "Cabintaxi" que dio lugar más tarde a la creación de una compañía con ese nombre. Una de las particularidades de este desarrollo fue el sistema de vía que permitía la circulación de vehículos en la parte superior y en la inferior de manera suspendida, situación que permitía su funcionamiento en direcciones opuestas. (Department of Transportation Bureau of Reserch New Jersey. 2007:25; University of Washington, 2010; Lozano et al., 2010:44-48).

Esta experiencia motivó en 1975, que la empresa Cabintaxi Co. desarrollara el sistema denominado "Cabinlift" para el Hospital Central de Bremen, con características particulares ya que su objetivo era conectar el edificio principal con las nuevas instalaciones del hospital para el traslado de pacientes. Esta instalación fue desmantelada en 2006 (University of Washington, 2010; Lozano et al., 2010:49-53).

El Cabintaxi fue considerado como la alternativa alemana al *Downtown People Mover Program* desarrollado por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos entre 1975-1979, cuyo reporte hemos analizado.

Entre 1972 y 1975 fue puesto en funcionamiento en el poblado de Morgantown USA, un sistema PRT, considerado una de las aplicaciones más exitosas de ese país, ya que hasta la actualidad ofrece servicio de transporte para la comunidad de la Universidad de Virginia



(West Virginia University). Destacan como particularidades de esta aplicación el largo periodo de funcionamiento sin percances (37 años con una confiabilidad del 99%), la capacidad de las cabinas de hasta 20 pasajeros y su funcionamiento mediante tres modos de operación que se ajustan a las características de la demanda reeditando en una buena relación costo-beneficio⁵ (Department of Transportation Bureau of Reserch New Jersey. 2007:23-25; Lozano et al., 2010:18-23).

Hay otras experiencias en el desarrollo de sistemas PRT, que han sido financiadas por gobiernos centrales, sin embargo, ninguna de estas pudo convertirse en un transporte comercial.

En la última década se ha desarrollado una importante cantidad de proyectos vinculados al desarrollo y aplicación del sistema PRT, los cuales han estado vinculados con empresas comprometidas con la investigación en este tipo de sistemas.

La empresa 2getthere es una de las más experimentadas y reconocidas en el desarrollo y aplicación de Automate People Mover Sistem, que comprende sistemas PRT y GRT, en el norte de Europa. Cuenta con la licencia exclusiva de la tecnología FROG, la cual permite que la movilidad de los vehículos no esté necesariamente ligada a una infraestructura de soporte (vía) pues desarrolla vehículos inteligentes. En la actualidad tiene dos productos ParkShuttle y CyberCab (2getthere, 2012).

A finales del siglo XX pusieron en funcionamiento instalaciones PRT en Amsterdam y Rotterdam en Holanda. La primera instalación fue en el Aeropuerto Schiphol en 1997 a la que se denominó "Park-Shuttle", cuyo objetivo fue mejorar la conexión con el estacionamiento P3. Una de las características principales de esta instalación era que su movilidad no estaba ligada a una infraestructura de soporte debido al uso de tecnología FROG; asimismo la capacidad de las cabinas era de hasta 12 pasajeros por lo que puede considerarse un Group Rapid Transit (GRT). Actualmente esta instalación está inactiva. (2getthere, 2012).

En Rotterdam en 1999 se puso en operación la primera fase de la instalación PRT a través de vehículo "Park-Shuttle" (2ª generación), su primera instalación urbana que conectaría la estación de metro Kralingse Zoom y el parque de negocios Rivium. La primera fase incluyó un túnel que cruzaría una carretera interestatal y un puente construido ex profeso, con una capacidad de movilidad de hasta 3500 pasajeros al día e intervalos entre vehículos de 2.5 minutos en promedio. En 2001 comenzó la segunda fase del proyecto pero más tarde un desafortunado accidente entre vehículos (vacíos) provocó su clausura y desmantelamiento en diciembre del 2005. Entre las particularidades de esta aplicación PRT destaca su aplicación urbana, el uso de sensores magnéticos insertados en el pavimento en un carril exclusivo y uso de tecnología FROG, así como su capacidad para transportar hasta 20 pasajeros por vehículo en modalidad GRT (2getthere, 2012; Lozano et al., 2010:40-44).

La empresa 2getthere está en funciones y cuenta con diversas aplicaciones entre las que destacan por su tipología y dimensión, las siguientes (2getthere, 2012):

- Instalación lúdica en el evento Floriade del año 2002 en el que funcionaron, por seis meses, 25 vehículos panorámicos eléctricos "CyberCabs" que facilitaron la conexión con una colina de observación mediante una ruta en espiral;

⁵ Los modos de funcionamiento comprenden los siguientes: por demanda cuando es poco predecible el número de usuarios, sus orígenes y destinos; en *horario programado* cuando la demanda es alta y los orígenes y destinos son altamente predecibles; y *modo de circulación* en horarios de baja demanda ya que los vehículos paran con una frecuencia determinada y constante en cada estación (Lozano et al., 2010:18-23).



- Instalación urbana en Masdar City (Abu Dhabi), la más ambiciosa hasta la actualidad, creada para esta ciudad concebida como “caminable”, cuyos trayectos largos están soportados en un sistema PRT que alcanza velocidades de hasta 40 km/h. Está previsto el funcionamiento de 3000 vehículos que darán servicio para 130,000 viajes/día en 85 estaciones, lo cuales trabajan con energía eléctrica renovable. Desataca la creación de un sistema de carga (entregas para residentes, comercios, etc.) denominado Freight Rapid Transitsystem (FRT), el cual se moverá a través de la infraestructura de soporte del PRT y podrá soportar hasta 1600 kg de carga útil.

Otra de las empresas que ha tenido un importante desarrollo en los últimos años es Ultra Global con sede en el Reino Unido. A principios del 2011, puso en funcionamiento su primera aplicación comercial y uno de los desarrollos PRT más ambiciosos de la última década en el Aeropuerto Internacional de Heathrow en Londres. El objetivo del sistema es conectar la Terminal 5 con el estacionamiento VIP de esta terminal, para ofrecer un servicio de conexión directa y sobre demanda. De acuerdo con datos de la empresa, el sistema moviliza en su red de 3.8 km, un promedio de 1000 pasajeros por día, haciendo uso de 21 vehículos y 3 estaciones (Ultra Global PRT, 2011).

La empresa Ultra en colaboración con Fairwood PVT Ltd, está desarrollando un proyecto de aplicación de la tecnología PRT en Asia, específicamente en la ciudad de Amritsar, localizada en la parte norte de India. Esta pretende ser, conjuntamente con Masdar City, una de las primeras aplicaciones urbanas de sistemas PRT, con una capacidad de transporte de hasta 50,000 pasajeros al día en 8 km de vías elevadas, la más larga del mundo. Esta aplicación se pretende poner en funciones en el año 2014 y está financiada por fundaciones privadas (Ultra Global PRT, 2011).

Vectus es otra de las empresas desarrolladoras de sistemas PRT localizada en Gran Bretaña pero con capital coreano. Cuenta con una estación de prueba en Suecia y entre los principales atributos del sistema esta su tecnología que le permite alcanzar velocidades de hasta 70 km/h. Cuenta con una sistema PRT en construcción en la ciudad de Suncheon en Corea del Sur.

Actualmente existen en diversos países programas importantes que están desarrollando tecnología PRT/GRT algunos de los cuales ya cuentan con instalaciones piloto en funcionamiento, con aplicaciones comerciales funcionando o en proceso de salir al mercado. Algunos gobiernos han apostado a favor de los sistemas PRT para atender problemas de movilidad urbana como una herramienta para disminuir la dependencia del petróleo, sin embargo, son aun escasas estas aplicaciones.

Ciertas ciudades de América Latina han expresado, en los últimos años, interés en este tipo de sistemas de transporte, es el caso de las ciudades de León en México a partir de la difusión de la tecnología del *Autotrén* y Teresina en Brasil, donde incluso algunos medios de comunicación difundieron el proyecto afirmando que estaría en funcionamiento en el año 2012, del cual, sin embargo, no se ha podido acceder a mayor información.

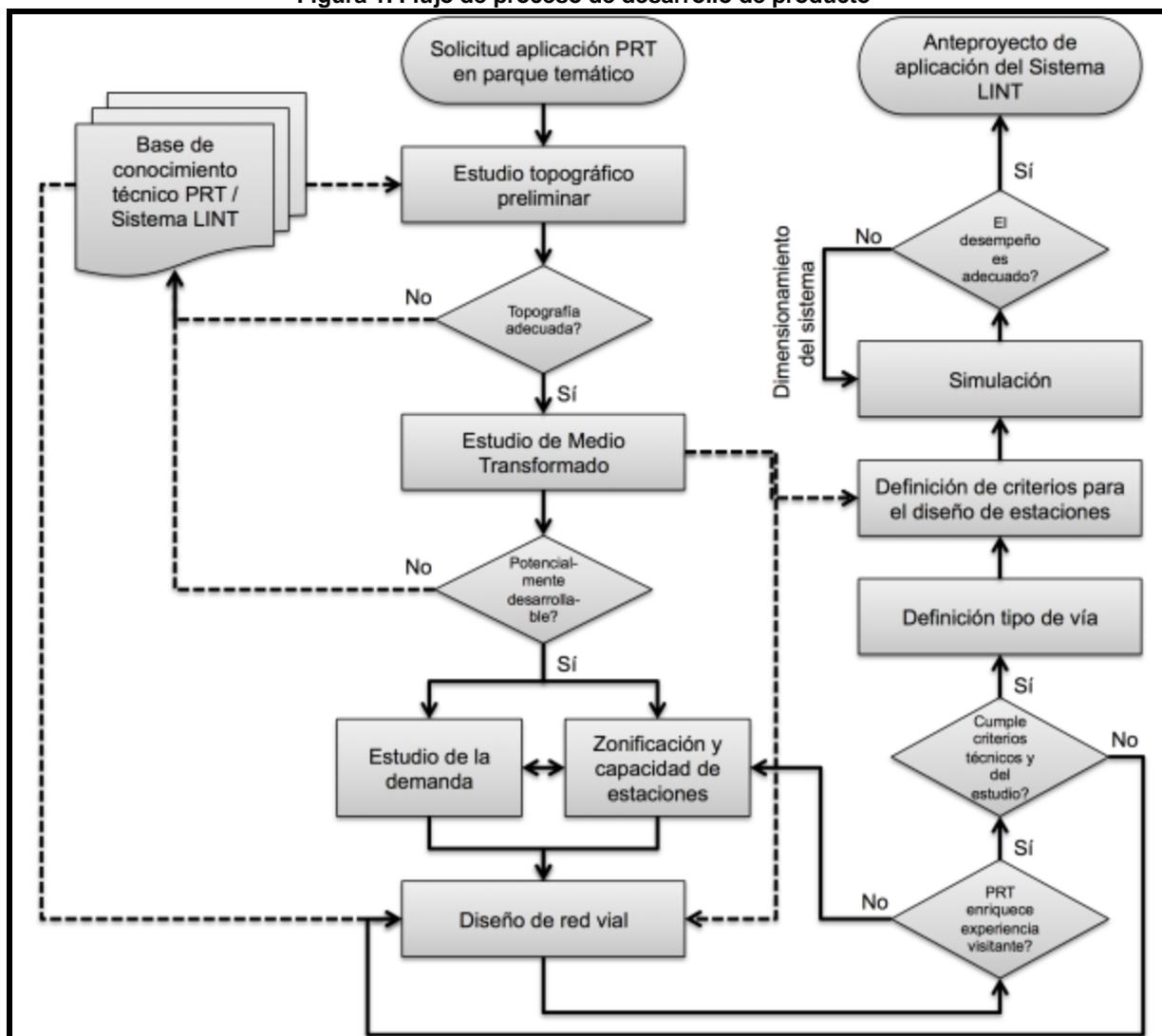
3. MODELO CONCEPTUAL PARA APLICACIÓN DEL AUTOTRÉN EN PARQUES TEMÁTICOS

En lo relativo a la aproximación teórico metodológica, el proceso que se consideró para la definición de la aplicación del Autotrén, atiende a la estructura de un flujo de actividad e información (Ulrich & Eppinger, 2004). En ese sentido, un proceso genérico de desarrollo de productos, contempla básicamente cinco fases: *planeación*, que incluye la valoración de los desarrollos en tecnología y de los objetivos de mercado, suposiciones y alcances; *desarrollo de concepto*, en la cual se identifican las necesidades de mercado, así como la descripción



de la forma, función y características de un producto; *diseño a nivel sistema* que incluye la definición de la arquitectura del producto y su desglose en subsistemas y componentes; *diseño de detalles*, que incluye la especificación completa de la geometría, materiales y tolerancias de los componentes del producto, así como su proveeduría.

Figura 1. Flujo de proceso de desarrollo de producto



Fuente: Adaptado de Ulrich & Eppinger, 2004.

Para el presente artículo solo se consideró la aplicación de las dos primeras fases propuestas por el flujo del proceso de desarrollo de productos.

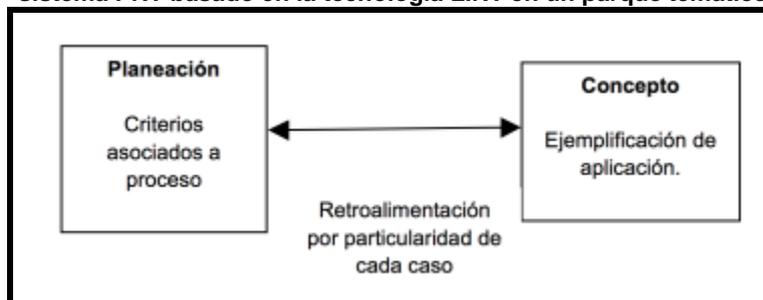
La fase de planeación, como su nombre lo indica, atendió las actividades vinculadas con la planeación del proceso de diseño y el desarrollo de aplicaciones en parques temáticos y áreas urbanas, mientras que la fase de desarrollo del concepto está referida a la propuesta específica, en nuestro caso el Zoológico Guadalajara. En lo general la fase de planeación integró aspectos relacionados con la plataforma y arquitectura del producto, incluyendo la visión de los usuarios. Como resultado se contará con un instrumento de planeación del diseño y desarrollo de la aplicación del sistema Autotrén.

La fase de desarrollo de concepto incluye la aplicación de las consideraciones desarrolladas en la fase de planeación en un caso específico, con la finalidad de evidenciar, por un lado, la pertinencia del instrumento de planeación del proceso de diseño y el desarrollo de aplicaciones en parques temáticos, y por otro, para generar evidencia experimental



mediante el desarrollo de modelos y prototipos de la estación, simulación con software especializado, determinación de la demanda; además de valoraciones del impacto en la experiencia del visitante y en el medio natural y transformado. Para la definición de un anteproyecto con sistemas PRT/GRT hemos establecido un conjunto de procesos clave estructurado en un mapa general (Figura 2).

Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de desarrollo de un anteproyecto para la aplicación de un sistema PRT basado en la tecnología LINT en un parque temático



Fuente: Elaboración propia.

3.1. Proceso para el estudio de la demanda

Determinar de manera cuantitativa las exigencias objetivas de demanda representa un desafío para el diseño de cualquier sistema de transporte. De la calidad de esta estimación depende directamente el resultado final del proyecto, tanto en su dimensionamiento global, como en la definición de la red y la ubicación de las estaciones.

En el caso de un parque temático, una aproximación es posible a partir de los datos disponibles sobre la afluencia de visitantes a las diferentes atracciones del parque. Sin embargo, los datos existentes pueden ser influenciados por la presencia de otros tipos de transportes internos y por el diseño de los recorridos peatonales.

En el caso de la aplicación del Autotrén al Zoológico de Guadalajara, al menos la mitad de los visitantes hacen uso un sistema de tren tradicional y en días atípicos puede llegar hasta el 78% (Cuadro 1).

Cuadro 1. Visitantes totales diarios y pasajeros del tren

	Visitantes	Pasajeros del tren
Domingo atípico	7.150	78%
Domingo típico	5.000	51%

Fuente: Zoológico de Guadalajara.

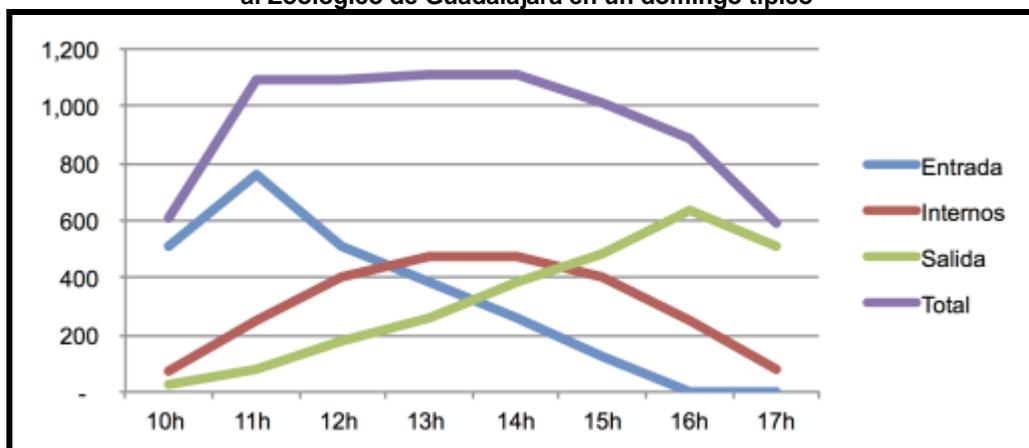
Particularmente importante es la estimación de la demanda a lo largo del día, ya que la eficiencia del sistema puede estar condicionada por una carga desbalanceada entre diferentes estaciones, situación que se verifica en los horarios pico de entrada y salida de visitantes.

En el caso de estudio, se estimó la distribución horaria aproximada de las entradas y salidas de visitantes a lo largo del día a través de encuestas de campo y observaciones directas. El número de viajes internos fue establecido a partir del número de atracciones visitadas a lo largo del día, con base en las encuestas, haciendo hipótesis sobre el posible uso del Autotrén para desplazarse entre las diferentes atracciones, ya que su flexibilidad para diseño de rutas acordes con los interés de los usuarios, difiere considerablemente del tren interno en funcionamiento, que cuenta con solo una ruta y tres estaciones.



El gráfico 1, muestra el número estimado de viajes en un domingo típico de entrada – desde las estaciones ubicadas en proximidad de los accesos hacia otras estaciones internas –, de salida e internos.

Gráfico 1. Distribución hipotética del número de viajes en periodos de una hora para el Autotrén aplicado al Zoológico de Guadalajara en un domingo típico

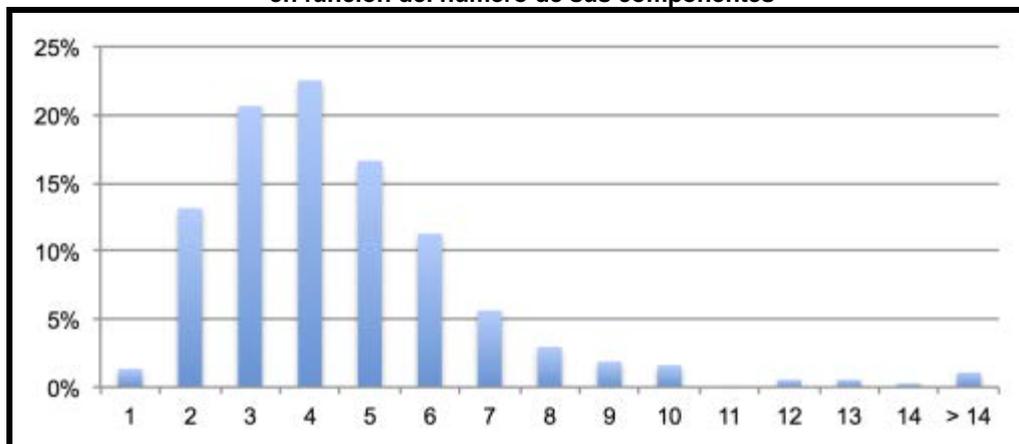


Fuente: Elaboración a partir de los resultados de encuestas propias, observaciones de campo y datos proporcionados por el Zoológico de Guadalajara.

La demanda total de viajes resulta máxima en las horas centrales del día, de 11:00 a 14:00 horas, mientras que los picos de demanda de entrada y salida se registran respectivamente a las 11:00 y a las 16:00. Estas condiciones extremas de demanda fueron objeto de particular atención durante las simulaciones. Para estimar la matriz de viajes solicitados entre las diferentes estaciones, se utilizaron los datos obtenidos por medio de las encuestas sobre las preferencias de los visitantes por las diferentes atracciones. A partir de ellos y con base en la ubicación de las estaciones propuestas en las diferentes hipótesis de recorrido, se establecieron las demandas aproximadas, teniendo en cuenta la zonificación propuesta y los recorridos peatonales.

Diferentes matrices fueron calculadas para cada hora del día y para cada hipótesis de recorrido, de manera que fue posible, en fase de simulación, estimar la eficiencia de cada propuesta de rutas, estaciones y ramales en diferentes condiciones de demanda y además detectar las horas pico. Con base en las encuestas efectuadas a los visitantes del zoológico, se observó que estos se desplazaban en grupos relativamente numerosos, situación que debía ser considerada en las simulaciones del Autotrén.

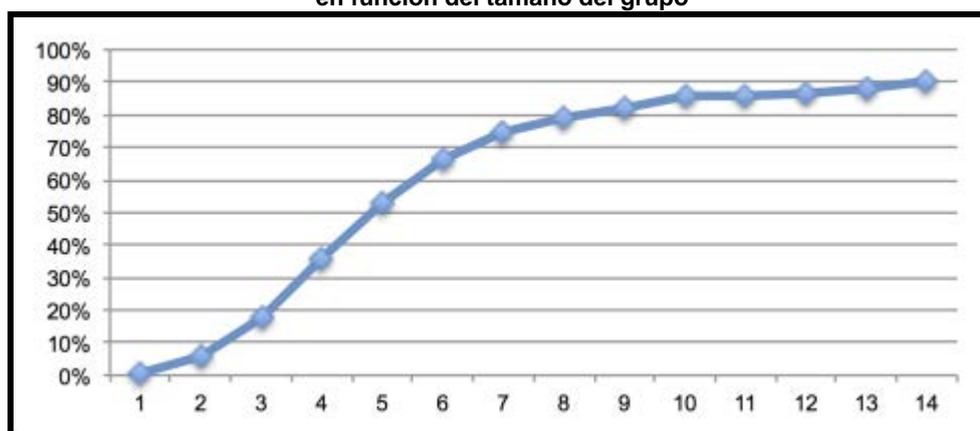
Gráfico 2. Distribución de frecuencias de los grupos de visitantes del Zoológico Guadalajara en función del número de sus componentes



Fuente: Elaboración a partir de encuestas propias.



Gráfico 3. Distribución acumulativa de visitantes del Zoológico Guadalajara en función del tamaño del grupo



Fuente: Elaboración a partir de encuestas propias.

En los gráficos 2 y 3 se puede notar como los grupos más numerosos están integrados por grupos de entre 3 y 5 personas. Poco más del 50% de los visitantes asiste al Zoológico de Guadalajara en grupos de 5 o menos personas. Debe recordarse a este propósito que la cabina del Autotrén para aplicaciones turísticas y recreativas cuenta con 5 asientos. Para las simulaciones, se utilizaron los datos de distribuciones para grupos de 1 a 5 personas, reportados en un valor total de 100%. Esto en consideración de que grupos de mayor tamaño deberán separarse para poder abordar los vehículos del Autotrén. Asimismo, se consideró la posibilidad de que pasajeros de diferentes grupos que viajan al mismo destino pudieran compartir el vehículo como estrategia para mejorar la eficiencia del sistema durante los picos de demanda.

Para aplicaciones urbanas es factible estimar la demanda en un corredor determinado, a partir de una pre-selección empírica de nodos y tramos para la realización de un Estudio de Aforos de Ocupación Visual. Es necesario generar gráficas de registro de aforo a lo largo del día por cada nodo, como información fundamental para definir los nodos de mayor demanda, definir la demanda en horas pico por cada nodo y el tipo de integración modal necesaria para hacer más eficiente el servicio.

Un criterio inicial para evaluar la factibilidad de aplicación del Autotrén en un corredor, está referido a la demanda mínima (viajes/día) para que su implementación sea rentable (Kyllmann, 2012).

3.2. Proceso para estudio de aspectos topográficos

Una de la restricciones más importantes que tiene el Autotrén, para cualquier tipo de aplicación, está referida a la topografía, cuya pendiente máxima de operación con reducción de velocidad o de aceleración es del 15% (Kyllman, 2011), por lo que es necesario realizar un primer estudio del perfil topográfico del polígono donde se aplicará el sistema. Un factor sustancial es la disponibilidad espacial para que, tanto el diseño de la vía como de los ramales, puedan librar tangencialmente la diferencia de niveles resultante de una pendiente pronunciada o en todo caso para que se pueda integrar una estación elevada. En el caso de que el polígono de aplicación tenga pendientes mayores a la máxima operativa (15%) y tenga a la vez poca disponibilidad espacial que afecte incluso la posibilidad de integrar una estación elevada, puede ser considerada como una limitación significativa para la aplicación del Autotrén.

Las principales restricciones de la red vial aérea del Auto Tren están referidas a los claros intercolumnios que van de 6 a 32 metros, y la luz libre ya sea para paso peatonal, para automóviles y vehículos comerciales es de 2.5, 4.3 y 5.7 metros respectivamente (Kyllman,

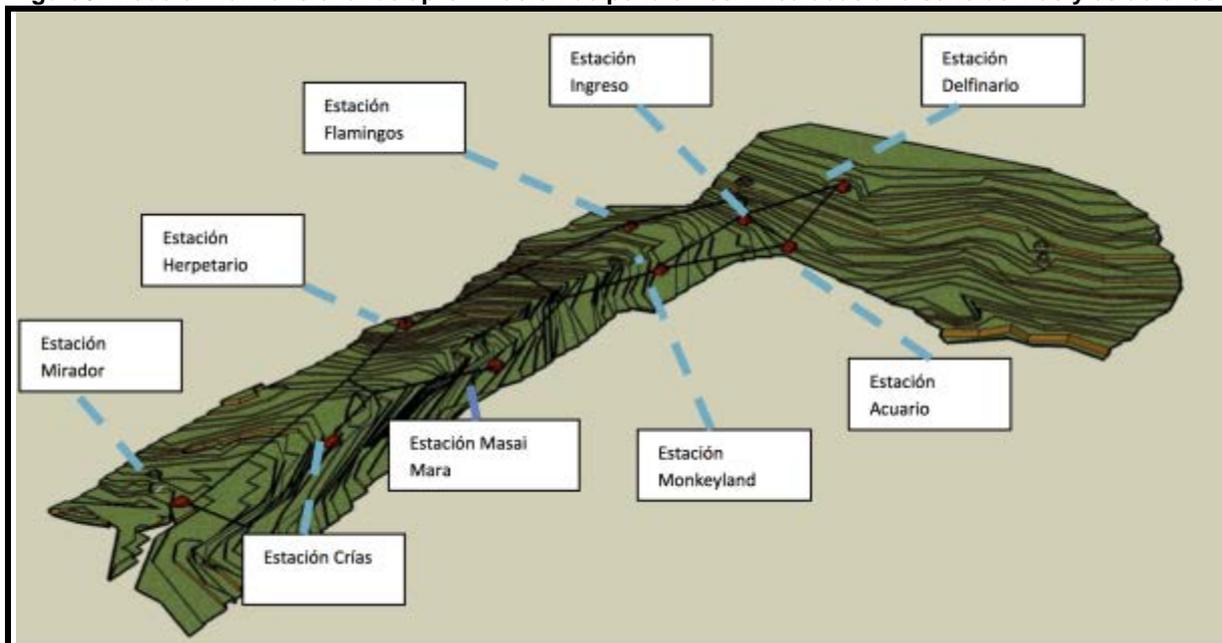


2011). Asimismo es necesario considerar una elevación de la vía, respecto del terreno natural, al menos de 90 centímetros aproximadamente (Kyllman, 2011 a), ya que se estructura mediante cimentaciones y traveses carril sin armadura, con una distancia mínima entre cimentaciones de 6 metros (Kyllman, 2011).

En el caso de los parques temáticos de alto valor paisajístico el estudio de la topografía aunada con la hidrología superficial se convierten en dos variables de diseño que determinan, por un lado la configuración de los ramales y por otro la altura de las vías, de las estaciones. En el caso del Zoológico Guadalajara, el polígono de estudio considerado presenta zonas de 0% a 15% de pendiente en los ingresos y en la zona que bordea la barranca; así como zonas con importantes pendientes que van del 15% al 25% y en casos excepcionales pueden superar esta, localizadas en la parte central del polígono, donde se concentran una buena parte de las atracciones del parque.

Bajo estas consideraciones, el área más problemática del proyecto para la localización de ramales, fue la transición del área de ingreso al ZG con el área del borde de la Barranca de Huentitán, que coincide con la mayor concentración de atracciones, lo cual representa por un lado la posibilidad de generar circulaciones que aprovechen dicho desnivel, en favor de aprovechar las vistas hacia la barranca y revalorizar la zona de borde de la misma.

Figura3. Modelo tridimensional de aproximación de pendientes vinculadas al diseño de vías y estaciones



Fuente: Elaboración propia.

La hidrología superficial representa otro aspecto territorial que va de la mano con el estudio topográfico y puede llegar a determinar la estructura espacial del polígono de aplicación. En el caso del Zoológico Guadalajara, un escurrimiento central determina la topografía del terreno, sin embargo el diseño del parque no ha respetado esta situación coyuntural ya que las planchas de las plazoletas de ingreso y el estacionamiento han roto la continuidad de los escurrimientos naturales. Esto ha provocado que los escurrimientos sigan en la práctica las sendas artificiales, situación adversa tanto para los peatones como por los sistemas de transporte a nivel de piso.

En caso de aplicaciones urbanas que rebasen la pendiente máxima operativa que requiere el Autotrén, es necesario considerar la disponibilidad de uso del espacio público (calles, plazas, parques), o en todo caso espacios privados susceptibles de expropiación. Asimismo, en el contexto de las ciudades mexicanas donde predominan urbanizaciones que sufren



inundaciones periódicas, es necesario considerar este como un factor que sumado a la escasa disponibilidad espacial puede restringir la implementación del Autotrén.

3.3. Proceso para estudio del medio transformado

Para el estudio del medio transformado se sugiere el análisis de los nodos de atracción y demanda, sobre todo en lo relativo al soporte físico que da soporte y accesibilidad a las atracciones y la disponibilidad de espacio para la implementación de la red vial y de las estaciones.

En el caso de aplicaciones urbanas, el tema es de naturaleza más compleja, por lo tanto es necesario tener un conocimiento profundo, no solo del entorno vinculado al corredor específico de aplicación del Autotrén, sino del contexto más amplio, la ciudad o la región en la que se pretende aplicar cualquier tipo de transporte público, pero sobre todo de una tecnología poco conocida como el Autotrén.

Se han identificado al menos cuatro aspectos que sería necesario reconocer: el soporte físico de las actividades (estructura material); aspectos funcionales relativos a la naturaleza y escala de los desplazamientos; la estructura social, fundamentalmente en términos económicos y educativos; finalmente las características culturales de los usuarios sobre todo en lo referente a las costumbres y preferencias que pueden influir en sus modos de desplazamiento (Miralles 2011).

Esta información nos ayudará a definir el *modelo de movilidad* de la ciudad a partir de la relación que existe entre las *escalas de movilidad*, los *motivos de viajes* y la *estructura social y cultural* de los usuarios (Miralles, 2011). Asimismo, el conocimiento de la relación entre las escalas de movilidad -barrial (colonia), distrital, municipal, metropolitana e incluso regional-, así como en lo relativo a la naturaleza de los desplazamientos (motivos), vinculados a cada una de estas escalas, permitirá reconocer los *tipos de desplazamientos*, en términos de *longitud, frecuencia y horario*, en los que puede ser adecuada la implantación del Autotrén, en términos de eficiencia, costo y rentabilidad.

Por otro lado, es necesario conocer las características de la relación entre distintos modos de transporte, es decir, qué tan integrados están (Miralles, 2011), para valorar la oferta de transporte de la ciudad y encontrar la oportunidad de implantación del Autotrén.

Es necesario contar con un estudio de orígenes y destinos de la ciudad, sin embargo, en términos generales estos manejan una dimensión fundamentalmente territorial, es decir, se limitan a localización de áreas de residencia con relación a los destinos diversos. A esta es necesario agregar la dimensión temporal para reconocer en qué momento del día, semana o mes se da cada uno de ellos.

En el caso de parques temáticos, la zonificación espacial y estructura conceptual ayudan a determinar los nodos de atracción y demanda. En el caso de los zoológicos, pueden identificarse dos niveles de análisis, el primero referido a los elementos de análisis propuestos por Yañez et al. (2005) para un estudio de circulación, que podrían resumirse en siguientes categorías.

- *Jerarquía espacial*: en orden de significación ascendente o descendente, espacio mayor contra menor; espacio público vs. espacio no-público; senderos primarios vs. senderos auxiliares o secundarios.
- *Definición de zonas*: zonas temáticas que componen al zoológico.
- *Criterios de amenidades*: en términos de cómo los servicios para visitantes están localizados en espacios de distribución o plazas, y cuál es la lógica de la circulación peatonal.



- *Elementos de organización de circulaciones*: accesos, distribución de áreas, áreas de exhibición animal.

Un segundo nivel está referido a la forma en que la estructura de circulaciones enriquece la vivencia del visitante respecto de una estrategia educativa, a partir de los siguientes elementos (Sariego, 1997; Coe, 2005):

- Diseño de hilos conductores de recorrido por etapas, generando patrones de circulación y continuidad de ideas; el estudio de longitud de recorridos y promoción de recorridos coherentes que permitan concentrar la atención de los visitantes en un tema específico.
- Interacción con las amenidades, para que se favorezca la observación y conocimiento de las especies exhibidas.
- Expansión sensorial, incluyendo instrumentos o circunstancias que aumenten las capacidades de observación e investigación, tales como lugares o emplazamientos de observación especial e instrumentos que amplíen la información de manera audiovisual durante la visita.
- Forma de traslado a través del recorrido, identificando aquellos que expandan sensorialmente la experiencia del visitante, que sean congruentes con la lógica de recorrido y con las interacciones de las amenidades.

En el caso del Zoológico Guadalajara, los nodos de atracción están definidos principalmente en tres áreas claramente identificables, dos áreas de ingreso y el área central, donde se encuentra la mayor concentración de atracciones (Cuadro 2).

La concentración de atracciones en las dos áreas de ingreso se ve potenciada por la generosidad del espacio abierto, el cual cuenta con abundancia de arbolado y jardines; así como por un conjunto de servicios complementarios tales como venta de alimentos y recuerdos. Se pueden identificar en estas áreas algunos espacios residuales, tanto en las plazoletas como en las sendas que las comunican.

La parte central del ZG es el nodo de actividad que concentra la mayor parte de las atracciones, entre otras, la selva tropical, el auditorio, el Safari Masai Mara, la Granja de animales, el Centro de alimentación de crías, la zona de exhibición de Primates o "Monkeyland", el oso polar y la segunda estación del tren. La estación del tren tiene la particularidad de incluir algunos comercios para el consumo de alimentos, sin embargo, en general dichas amenidades son subutilizadas.

Esta área puede ser considerada como el centro neurálgico del ZG, y coincide con un cambio dramático de nivel y con pendientes que van del 15 a 25% o más, así como la exteriorización del arroyo que articula al polígono del Zoológico, lo cual significa que es a la vez una frontera y el remate para los usuarios que vienen desde la Barranca de Huentitán. Aun cuando existe un potencial ambiental importante por el arroyo, la vegetación y el paisaje, no existe ningún espacio que funcione como instrumento articulador para la educación ambiental, además es escaso el equipamiento para actividades de descanso-juego.

El área localizada en el borde de la Barranca de Huentitán, presenta pendientes de entre el 5 y 10%, si bien posee un alto potencial paisajístico y lúdico dado que integra un área de descanso y comida al aire libre asociada con la última estación del tren, tiene accesibilidad limitada y pocos espacios y amenidades que faciliten la observación de este importante recurso ambiental.

En términos generales podemos afirmar que el criterio de diseño de los senderos confunde y entorpece la conectividad de las áreas descritas, mientras que el circuito del tren no incorpora la riqueza paisajística del territorio ni contribuye a mejorar sustancialmente la



observación de las especies que se exhiben, dado que en muchos puntos del recorrido hay puntos ciegos y deficiencias en el manejo de los niveles.

Cuadro 2. Distribución de preferencias entre las atracciones del Zoológico de Guadalajara

Atracciones	Menciones	%
Ingreso Calzada Independencia		
Acuario	71	14.3%
Villa australiana	47	9.5%
Área central		
Auditorio	25	5.0%
Aviario	42	8.5%
Delfinario	17	3.4%
Herpetario	39	7.9%
Monkeyland	78	15.7%
Rancho	38	7.7%
Safari	56	11.3%
Selva tropical	48	9.7%
Otros		
Tren	35	7.1%
Total	496	100.0%

Fuente: Encuestas propias, levantadas en octubre del 2011.

En las áreas descritas se hacen evidentes una serie de espacios residuales tanto en la estructura de senderos, como en las atracciones y áreas de exhibición, que tienen potencial para ser recuperados, e incluso rediseñados, a partir de la propuesta de movilidad del Autotrén, contemplando el arroyo como recurso integrador. Asimismo, dicha renovación puede aprovechar el potencial paisajístico del área limitante con la Barranca de Huentitán, introduciendo nuevas amenidades que complementen la parte de observación de la Barranca y generen un complejo de educación ambiental y de ocio que resignifique dicha área.

3.4. Proceso para el diseño de red vial

El diseño de la red vial contempla dos tipologías que corresponden con el mismo número de objetivos: la *red vial de pasajeros (RVP)* cuyo objetivo es vincular los nodos de demanda y destino de viajes; y la *red vial operativa (RVO)*, cuyo objetivo es facilitar las maniobras de operación del sistema Autotrén. En esta fase es necesario determinar el tipo de cabina de acuerdo con la demanda que atenderá, los vehículos urbanos tienen una capacidad de 12 pasajeros sentados, mientras que los vehículos turísticos tienen capacidad de hasta 4 pasajeros, con la posibilidad de no compartir viajes con extraños. Es factible combinar el uso de ambas cabinas y de tener tarifas por cada tipo de servicio.

Para el caso de aplicaciones urbanas, se han considerado los siguientes los criterios para el diseño de la RVP y la RVO:

- Identificación de los principales nodos de demanda a partir del Estudio de ocupación visual elaborado como parte del proceso de análisis de demanda.
- Identificación de los principales flujos y tipos de movilidad (peatonal, no motorizada, motorizada pública y privada, etc.) en cada nodo estratégico de la red, para intervenir con criterios de *accesibilidad universal*.
- Determinación inicial del tamaño (número de módulos) de la estación y del tipo de cabina (capacidad del vehículo) a partir de la demanda estimada en cada nodo.
- Estudio de los espacios públicos en los que se pretende instalar las estaciones, la RVP y la RVO, a partir de los derechos de vía, las características físicas de las vialidades



(sección, materiales, grado de conservación, etc.), la identificación de áreas residuales o de posible expropiación; así como de la infraestructura complementaria existente y necesaria (puentes, cruces peatonales, etc.).

- Identificación del tipo de integración modal con otros sistemas de transporte en cada nodo de la red -resultante del proceso análisis del estudio de demanda- para considerarla en cada estación y hacer más eficiente el servicio.

Para el caso de la implantación del Autotrén en un parque temático ya existente, los criterios para el diseño de la ruta de pasajeros, deben partir del reciclaje de las instalaciones y circulaciones disponibles. En ese sentido los elementos de análisis mínimos a considerar son (Olivares et al., 2011):

- Identificación de los principales nodos de atracción del parque temático, con el objetivo establecer una vinculación congruente con la importancia de las zonas temáticas y amenidades.
- Determinación de la infraestructura peatonal existente y revisar su aprovechamiento o modificación de acuerdo con a localización de dichos nodos de atracción.
- Determinación inicial del tamaño (número de módulos) de la estación y del tipo de cabina (capacidad del vehículo) a partir de la demanda estimada en cada nodo.
- Identificación de los espacios abiertos y edificados residuales que pueden ser aprovechados: áreas en plazoletas, jardines y azoteas de las edificaciones actuales, entre otros.
- Identificación de los hilos conductores de los recorridos de mayor valor paisajístico, para aprovechar aquellos que permiten la expansión sensorial y la interacción con las amenidades del parque temático por parte del visitante.

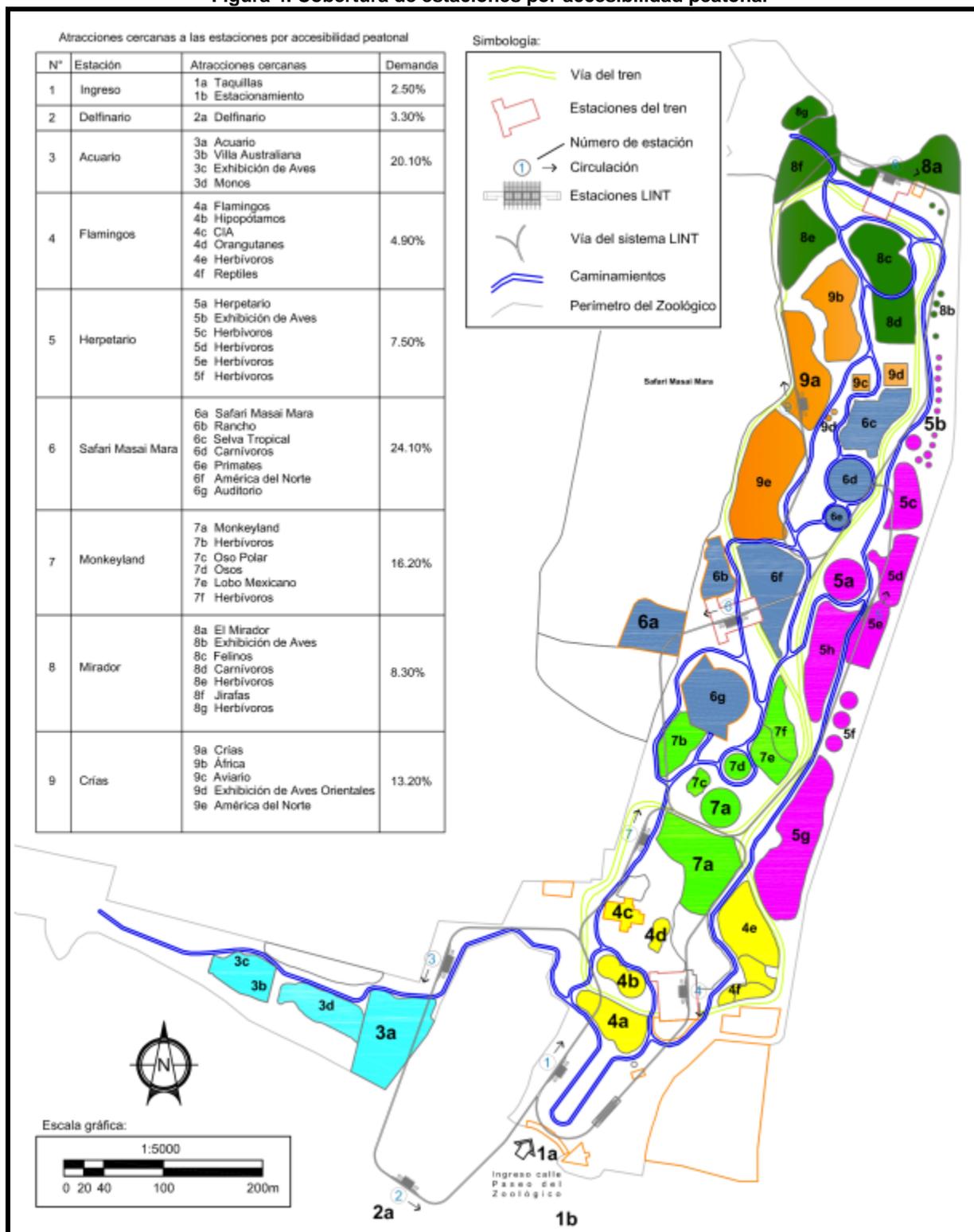
En el caso del ZG la infraestructura instalada, presenta buenas posibilidades de reutilización. Destacan las estaciones que actualmente dan servicio al tren tradicional, las cuales son ya identificadas por los visitantes y cuentan con una determinada demanda, así como algunos tramos de la vía de circulación del tren mencionado. En la Figura 4 se puede observar el resultado del estudio de la cobertura de las estaciones existentes en el ZG (Figura 4).

La infraestructura peatonal (senderos) con la que cuenta el ZG, está integrada a la zonificación, sin embargo, por las características topográficas del terreno y la infraestructura del tren tradicional, presenta bastantes obstáculos para el peatón (visitante). Esta situación requiere de un análisis específico que dé lugar a la propuesta de una red coherente para el Autotrén que considere la integración entre los recorridos peatonales, los nodos de demanda y la localización de las estaciones.

Uno de los objetivos complementarios de la implantación del Autotrén en el ZG es la recuperación del espacio liberado por la huella en el territorio del tren existente. La definición de un nuevo recorrido para el Autotrén, permitirá que una buena parte de los 3.5 km del recorrido del terreno altamente artificializado de los rieles y del espacio de seguridad del tren, puedan ser reincorporados al hábitat de los animales y a los senderos peatonales. Se calcula entonces la reincorporación de aproximadamente 14,000 m² a partir de un análisis espacial preliminar del polígono.

La reintegración del espacio liberado se hace a partir del rediseño de la experiencia a escala del hombre de los recorridos, tanto en lo referente a la red de senderos que permita una mayor acercamiento a la vida animal, como en la calidad de los materiales utilizados desde el punto de vista de la afectación al ambiente, con la intención de provocar una mimesis con los hábitats presentes y con los espacios escenográficos de observación.

Figura 4. Cobertura de estaciones por accesibilidad peatonal



Fuente: Elaborado a partir de la encuesta levantada en campo.

Desde el punto de vista operativo, el diseño de la red vial debe responder a ciertas características funcionales definida por el Autotrén. Por ejemplo, debe definirse la ubicación de las estaciones y la dirección de marcha de los vehículos en los diferentes tramos de la red. Las intersecciones entre ramales pueden ser solo de dos tipos simples: unión de dos ramales en uno (*merge*) o división de un ramal en dos (*diverge*). La red debe contar también con un depósito de almacenamiento de los vehículos cuando no sea necesario desplegar la



flotilla completa a la red. Otros lineamientos para el diseño operativo de la red, responden a criterios de eficiencia y son comunes a otros sistemas PRT/GRT.

En la aplicación del ZG, en particular, se utilizó un diseño en el cual la red vial está formada por anillos simples de rieles de una sola vía, yuxtapuestos y orientados en sentidos opuestos. Este tipo de diseño es muy eficiente y ampliamente utilizado en redes PRT/GRT.

Durante la primera etapa de simulación, se pusieron a prueba diferentes diseños de rutas y ramales. Estos recorridos fueron evaluados a través de simulaciones por medio del software PRT Sim. En las figuras 5 y 6 se presentan, a título ejemplificativo dos de los diseños tomados en consideración inicialmente. Ambos diseños prevén 12 estaciones y un recorrido que se extiende hasta los estacionamientos, localizados en los ingresos.

Figuras 5. Ejemplo de diseños de rutas, ramales y ubicación de estaciones para la aplicación del Autotrén en el Zoológico de Guadalajara

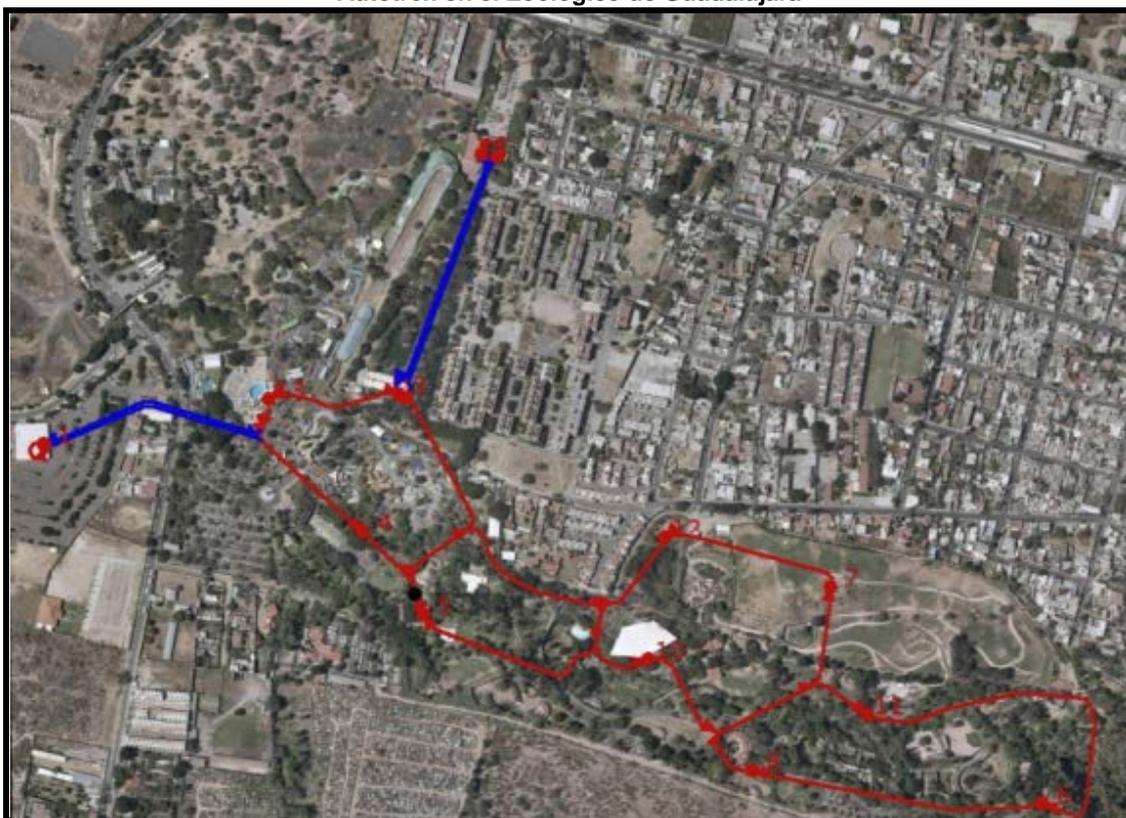


En las Figuras 7 y 8, se presenta el recorrido que finalmente fue elegido para el diseño final. En ese caso cuenta con un número menor de estaciones (9) y también con una longitud inferior de rieles (3.3 km).

En el Cuadro 3, se muestran algunos de los parámetros tomados en consideración para evaluar la eficiencia del sistema en la fase inicial. Se puede notar que, a paridad de condiciones de demanda, velocidad y número de vehículos, el recorrido elegido (Figura 6) tiene una capacidad mayor, reduce considerablemente los tiempos de espera promedio y máximo y al mismo tiempo ofrece un menor costo de inversión debido a la longitud reducida y al menor número de estaciones.



Figura 6. Ejemplo de diseños de rutas, ramales y ubicación de estaciones para la aplicación del Autotrén en el Zoológico de Guadalajara



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Recorrido final elegido a través del proceso de simulación para la aplicación del Autotrén en el Zoológico de Guadalajara

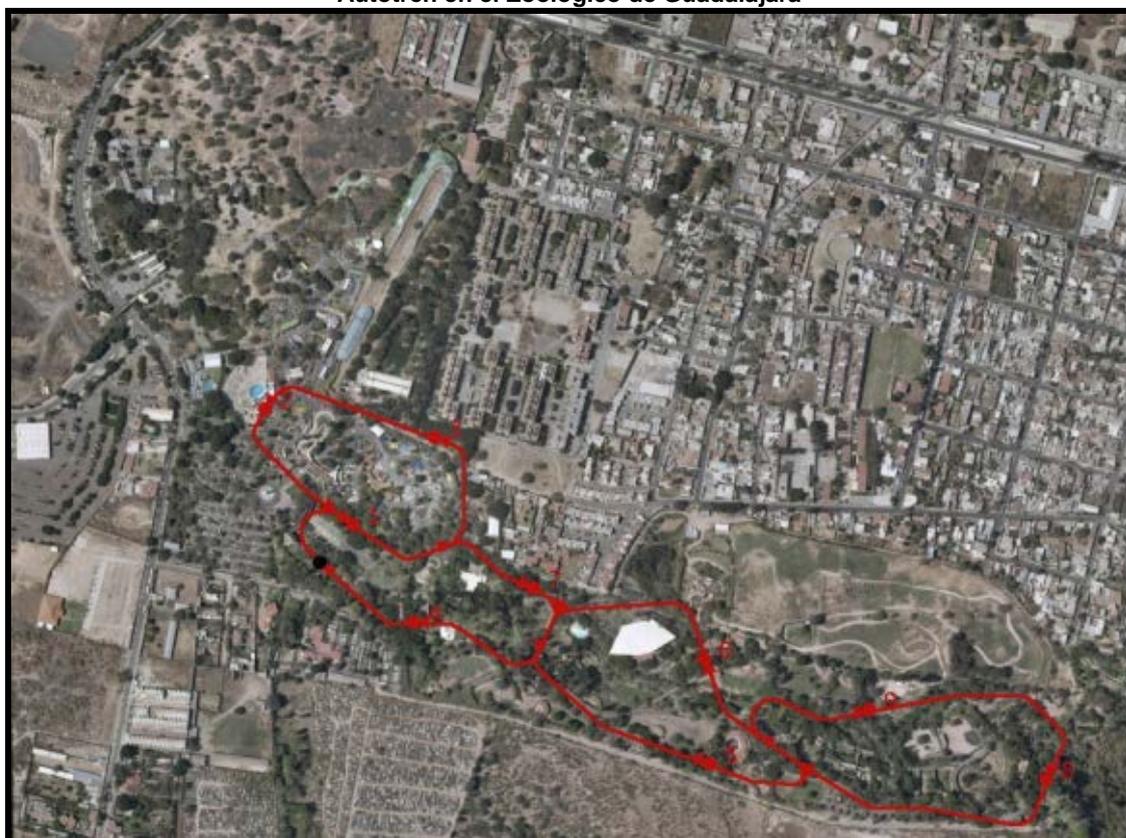
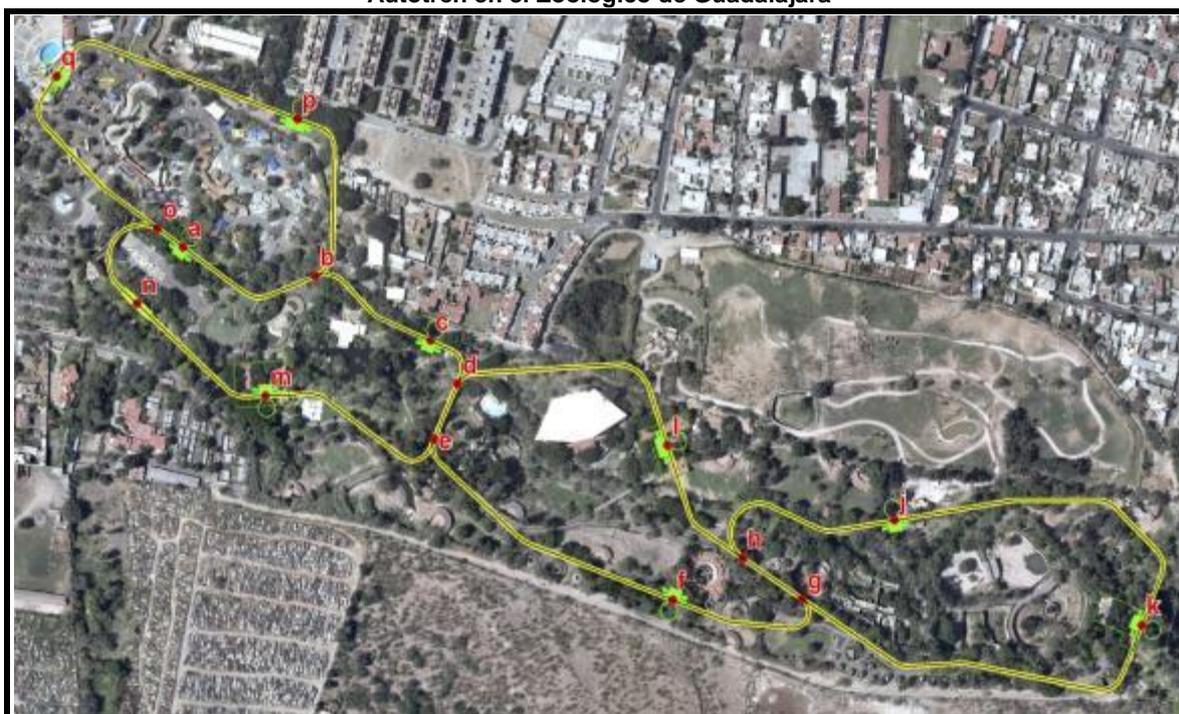




Figura 8. Recorrido final elegido a través del proceso de simulación para la aplicación del Autotrén en el Zoológico de Guadalajara



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3. Resultado de la evaluación de 3 diferentes diseños de sistemas LINT en horario pico, bajo demanda de un domingo típico

Recorrido	Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3
Horario	11h	11h	11h
Número de vehículos	35	35	35
Velocidad normal (m/s)	5.0	5.0	5.0
Velocidad en tramos de alta velocidad (m/s)	N.A.	10.0	N.A.
Número de estaciones	12	12	9
Longitud rutas (km)	4.5	4.8	3.3
Longitud rieles estaciones (km)	0.38	0.44	0.37
Pasajeros transportados (1 h)	856	904	956
Pasajeros dejados en espera	194	161	38
Tiempo promedio de espera (min)	6.0	7.1	0.9
Tiempo máximo de espera (min)	42.5	14.6	3.1

Fuente: elaboración propia.

3.5. Proceso para diseño del tipo de vía

Una vez diseñada la red vial, se procede al diseño de la vía, la cual puede considerarse dos tipologías: terrestre o aérea. Para la elección de la más adecuada hemos definido un conjunto de criterios y un proceso de verificación de la propuesta que nos ayudará a fortalecer dicha elección. Las variables que ayudaron a definir los criterios son las siguientes: topografía e hidrología superficial; disponibilidad espacial; tiempos y costos de ejecución; aprovechamiento del paisaje, en el caso de aplicaciones lúdicas; y la eficiente vinculación con los nodos de demanda en términos de la relación distancia/tiempo, muy importante en el caso de aplicaciones urbanas.

Un primer criterio de diseño del tipo de vía depende de la configuración topográfica, así como su interacción con la hidrología superficial prevaleciente en el polígono de aplicación del Autotrén. Cuanto mayor sea el valor de la pendiente y si este se asocia con escurrimientos naturales es deseable la habilitación de vías aéreas. Sin embargo, la interacción con pendientes suaves o planas suponen en algunos casos el uso de vías a nivel de suelo. La vía aérea es más factible en casos de escasa disponibilidad espacial para la



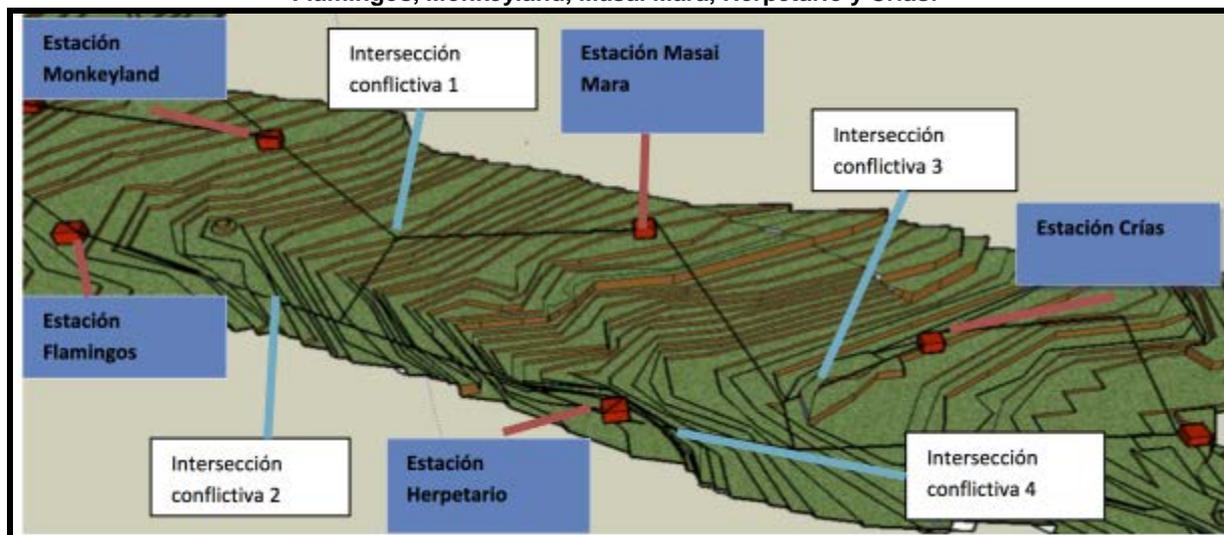
infraestructura de la red vial y en casos de aplicaciones lúdicas, donde el aprovechamiento del paisaje es un objetivo central del diseño.

La eficiente vinculación con los nodos de demanda, en términos de la relación distancia/tiempo, es un factor central en el caso de aplicaciones urbanas, de manera que puede dar preferencia la red vial aérea en el caso de tejidos urbanos orgánicos que en caso de ser terrestres provocarían una mayor longitud de la vía que se traduciría también en un mayor tiempo de recorrido. Dado que el costo de la red vial aérea es superior al de la terrestre, en caso de poder decidir entre ambas, es necesario hacer una ponderación costo/beneficio.

Desde los primeros estudios en el ZG fue evidente el reto que representaba la coordinación entre las pendientes y escarpes del área central con las posibilidades que puede ofrecer la vía del Autotrén. El objetivo de la intervención fue potenciar, en la medida de lo posible, el cambio de niveles topográficos con la riqueza paisajística del territorio y la observación de los hábitats de los animales. Asimismo, la reutilización e integración de las estaciones del tren existente con las estaciones nuevas. Subsidiariamente se pretendió replantear las amenidades mediante recursos para la educación ambiental.

En función de los criterios mencionados, el primer ejercicio consistió en un modelado tridimensional de la topografía del ZG, en el que se insertó la ruta vial a una altura de 4 metros, como hipótesis para identificar las zonas más problemáticas. A partir de dicho ejercicio se hizo evidente que las interacciones entre las estaciones Flamingos, Herpetario, Masai Mara y Monkeyland resultaban las más problemáticas dado que tenían un rango de pendiente que fluctuaba del 26% al 52% (Olivares et al., 2011). Asimismo se dispusieron 9 estaciones atendiendo a criterios de demanda y disponibilidad espacial, incluyendo las que se propusieron en las azoteas de las estaciones del tren preexistente. En una segunda propuesta se incluyeron dos estaciones más que conectarían con los estacionamientos de los ingresos del ZG.

Figura 9. Intersecciones conflictivas detectadas entre las estaciones Flamingos, Monkeyland, Masai Mara, Herpetario y Crías.



Fuente: Elaborado a partir de relevamientos propios.

Una vez definido el diseño de la red, es oportuno verificar la factibilidad de su diseño vertical, teniendo en cuenta las limitaciones y los criterios expuestos en el apartado anterior. En la figura 10 se muestran los puntos utilizados como referencia para calcular las pendientes de cada tramo y que corresponden a cada estación, unión de vías (merge) o división de la vía (diverge).



Figura 10. Esquema de vías y puntos utilizados para el cálculo de pendientes



Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 4 se resumen los datos altimétricos y de elevación respecto de la superficie de los puntos de referencia mostrados en la figura anterior. La elevación de la vía se estableció de acuerdo con los criterios de diseño, accesibilidad y confort especificados anteriormente.

Cuadro 4. Elevación y altimetría de los puntos utilizados para establecer las secciones verticales y el cálculo de las pendientes de las vías

Nodo	Nombre	Tipo	Elevación (m)	Cota superficie (msnm)
a	Paseo Zoológico	Estación	3.0	1525
b		Diverge	2.0	1520
c	Monkeyland	Estación	0.6	1514
d		Merge	9.0	1506
e		Diverge	3.0	1513
f	Herpetario	Estación	4.0	1502
g		Merge	4.0	1491
h		Diverge	3.0	1491
j	Crías	Estación	0.6	1487
k	Mirador	Estación	4.0	1479
l	Masai Mara	Estación	4.0	1495
m	Flamingos	Estación	4.0	1519
n		Deposito	3.0	1526
o		Merge	4.0	1526
p	Acuario	Estación	0.6	1526
q	Delfinario	Estación	5.0	1538
1		Intermedio	3.0	1539
2		Intermedio	1.0	1531
3		Intermedio	1.5	1511
4		Intermedio	6.3	1476
5		Intermedio	0.6	1493
6		Intermedio	2.0	1510
7		Intermedio	0.6	1528

Fuente: elaboración propia con datos altimétricos a partir de curvas de nivel con intervalo de 1m del Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco (IITJ).

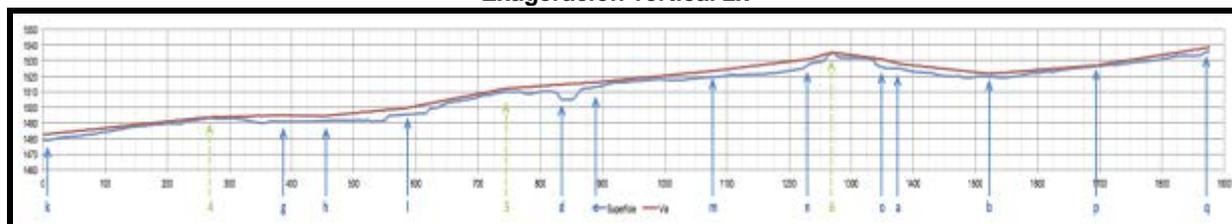
Los Gráficos 4 y 5 muestran los perfiles topográfico y de vías para el recorrido propuesto.



El ejercicio se completó con la simulación de la ubicación y el cálculo aproximativo del número y altura de los postes que sostendrían a la vía del Autotrén. Para ello se utilizó una distancia óptima entre postes de 20m.

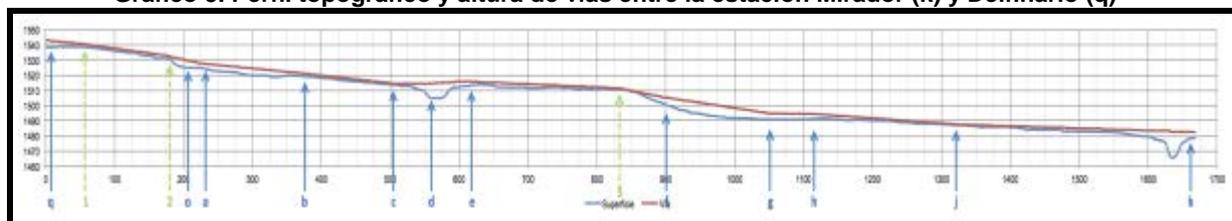
En el Cuadro 5 se resumen para cada tramo de vía los datos de longitud, pendiente promedio y máxima de la vía, número de postes, su altura promedio y la longitud total de los mismos.

Gráfico 4. Perfil topográfico y altura de vías entre la estación Delfinario (q) y Mirador (k). Exageración vertical 2x



Fuente: Elaboración propia. Perfil topográfico elaborado a partir de curvas de nivel del IITJ.

Gráfico 5. Perfil topográfico y altura de vías entre la estación Mirador (k) y Delfinario (q)



Fuente: Elaboración propia. Perfil topográfico elaborado a partir de curvas de nivel del IITJ.

3.6. Proceso para dimensionamiento y verificación del sistema

Para determinar el número de vehículos y la velocidad de los mismos, se requiere verificar la eficiencia del sistema en diferentes condiciones a través de un sistema de simulación. Para ello, es necesario establecer las métricas que serán consideradas como aproximación a las medidas de eficiencia. Este proceso debe considerar, días típicos y atípicos, así como diversos momentos del día que correspondan con modificaciones en la demanda de viajes. Durante la simulación es necesario experimentar, bajo diversas hipótesis, haciendo ajustes en el número y capacidad de los vehículos y la velocidad de los mismos, e incluso en los tiempos de espera y recogida de pasajeros, para evaluar las condiciones en las que el sistema es más eficiente, como a continuación lo ejemplificamos con el caso del ZG. Es necesaria llevar a cabo este proceso en retroalimentación con los anteriores (feedback), en función de las diversas hipótesis y resultados de la simulación.

Para el caso del ZG en el estudio de simulación se utilizó el software PRT Sim, diseñado por el asesor en sistemas PRT/GRT Ingmar Andréasson, sin embargo, para la aplicación urbana prevista en el año 2013 se prevé utilizar el software de simulación propio del Autotrén, desarrollado por el CINVESTAV Guadalajara.

El Cuadro 6 siguiente se refiere al resultado final de la simulación en el caso del ZG, considerado como satisfactorio, con 35 vehículos, viajando a una velocidad nominal de 5 m/s. Es posible observar cómo en condiciones de demanda típica, el Autotrén soporta la carga de viajeros en todos los horarios del día, con tiempos de espera máximos siempre inferiores a 5 min. El tiempo promedio de espera varía entre 0.7 y 1.7 min.



Cuadro 5. Resumen por secciones de las principales informaciones recabadas del ejercicio de simulación del perfil topográfico y de vías.

Tramo de vía	Longitud (m)	Pendiente promedio	Pendiente máx.	Elevación mín. (m)	Elevación máx. (m)	Nº Postes	Altura promedio (m)	Suma postes (m)
q-o	194.9	6.8%	9.9%	0.4	5.0	9	2.2	19.6
o-a	29.7	7.0%	9.6%	2.8	4.1	2	3.4	6.9
a-b	144.0	4.4%	4.6%	2.0	4.9	7	4.0	28.0
b-c	130.4	5.3%	5.7%	0.4	2.0	7	1.2	8.4
c-d	57.2	0.0%	0.0%	0.6	9.0	2	1.6	3.3
d-e	54.8	-2.4%	-2.4%	3.0	10.1	3	7.5	22.6
e-f	283.4	3.6%	11.2%	0.2	4.0	15	2.0	30.7
f-g	155.8	6.9%	7.3%	4.0	8.1	7	6.7	47.0
g-h	68.3	0.8%	0.8%	3.0	4.0	3	3.8	11.5
h-j	205.4	3.3%	3.4%	0.4	3.0	11	1.5	16.3
j-k	344.0	1.5%	1.7%	0.5	17.1	17	2.2	36.6
k-g	381.1	-3.2%	-4.2%	0.2	4.6	19	1.6	29.6
g-h	68.3	0.8%	0.8%	3.0	4.0	3	3.8	11.5
h-l	131.7	-3.8%	-4.1%	3.0	7.2	7	4.8	33.5
l-d	251.7	-6.1%	-7.3%	0.4	9.0	13	2.2	28.5
d-e	54.8	-2.4%	-2.4%	3.0	10.1	3	7.5	22.6
e-m	189.8	-3.9%	-4.1%	1.3	4.2	10	2.8	28.1
m-n	155.2	-4.9%	-5.4%	3.0	6.3	8	5.5	44.3
n-o	116.1	0.9%	-13.7%	0.2	4.0	6	1.6	9.8
o-a	29.7	7.0%	9.6%	2.8	4.1	2	3.4	6.9
a-b	144.0	4.4%	4.6%	2.0	4.9	7	4.0	28.0
b-p	170.6	-3.1%	-3.3%	0.6	3.2	9	1.9	17.5
p-q	257.3	-6.3%	-6.8%	0.4	5.2	13	2.6	34.1
Recorrido total	3618.3	-	-13.7%	0.2	17.1	183	2.9	525.1

Fuente: Elaboración propia.

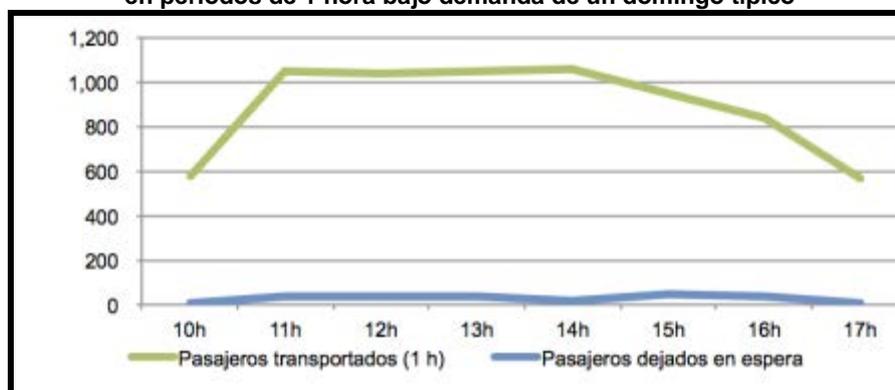
Nota: Las pendientes con signo negativo deben considerarse de subida para los vehículos, en base al sentido de circulación de los mismos propuesto en el proyecto.

Cuadro 6. Resultado de la evaluación de cuatro parámetros de eficiencia en periodos de 1 hora bajo demanda de un domingo típico

Horario	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
Pasajeros transportados (1 h)	578	1,044	1,043	1,052	1,063	949	835	566
Pasajeros dejados en espera	5	41	37	40	16	47	37	8
Tiempo promedio de espera (min)	0.7	1.3	1	1.4	1.1	1	1.7	1.1
Tiempo máximo de espera (min)	2.5	4.3	4.7	4.8	4.8	4.7	5.1	4.6

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 6. Capacidad de transporte del Autotrén en periodos de 1 hora bajo demanda de un domingo típico



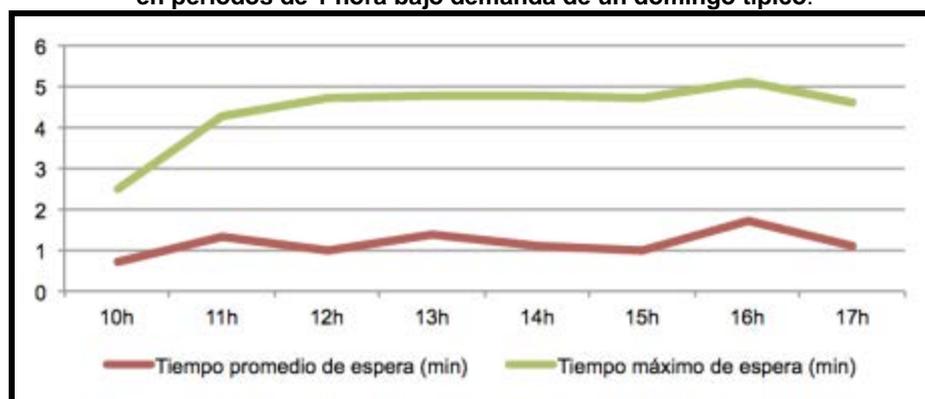
Fuente: Elaboración propia.



En cuanto a la capacidad de carga, los resultados muestran que el sistema así diseñado, gracias a su flexibilidad, permite satisfacer la demanda horaria a lo largo del día sin saturarse. En el gráfico anterior se puede notar como el número de pasajeros transportados en el periodo de una hora aumenta al aumentar de la demanda, mientras que el número de pasajeros residuos que quedan al terminar el periodo de simulación es mínimo y queda invariado a lo largo del día.

Si consideramos el tiempo promedio de espera, podemos notar que su variación no es significativa a lo largo del día típico, mientras que el tiempo máximo experimentado en una hora de simulación, queda en un rango óptimo inferior a 5 min.

Gráfico 7. Simulación de la variación de tiempos de espera promedios y máximos en periodos de 1 hora bajo demanda de un domingo típico.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se verificó el diseño del sistema simulando las condiciones de demanda máxima de un domingo atípico. Estas corresponden a un aumento del 119% en el número de pasajeros, de acuerdo con los datos proporcionados por el ZG.

En la tabla que sigue se muestran los resultados de los cuatro parámetros considerados anteriormente, para la simulación del domingo atípico en periodos de una hora. La simulación se efectuó con un idéntico número de vehículos (35) y por idéntica velocidad nominal (5 m/s.)

Cuadro 7. Resultado de la evaluación de cuatro parámetros de eficiencia en periodos de 1 hora bajo demanda de un domingo atípico

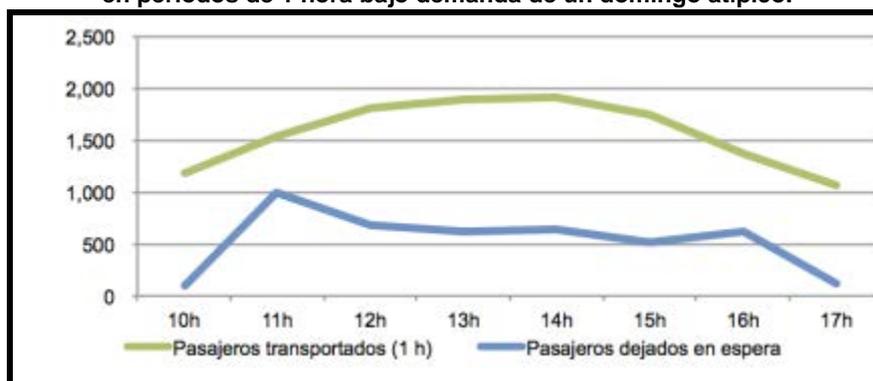
Horario	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
Pasajeros transportados (1 h)	1,173	1,545	1,802	1,883	1,918	1,750	1,367	1,065
Pasajeros dejados en espera	98	984	685	623	632	525	626	127
Tiempo promedio de espera (min)	2.5	12.6	8.1	7.5	8.2	7	9.7	2.5
Tiempo máximo de espera (min)	7	31.4	28	22.5	25.8	22.6	25	8.6

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de capacidad, muestra claramente cómo en estas condiciones, con un número limitado de vehículos, el sistema se satura rápidamente, considerando el elevado número de pasajeros dejados en espera al terminar el periodo de simulación. La capacidad máxima efectiva, medida en términos de pasajeros por hora, se alcanza en las horas centrales del día, cuando la demanda de viajes se distribuye de manera más equilibrada entre las diferentes estaciones, mientras que a las 11 y 16 horas, cuando la demanda se concentra en las estaciones de entrada, se evidencia una menor capacidad y picos en el número de pasajeros en espera.

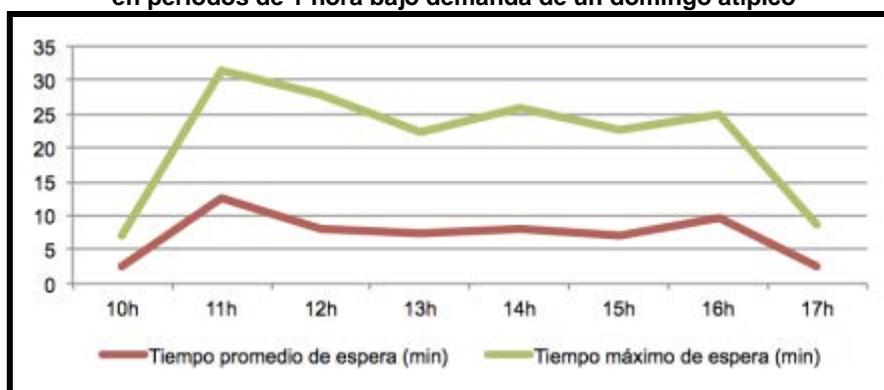


Gráfico 8. Capacidad de transporte del Autotrán en periodos de 1 hora bajo demanda de un domingo atípico.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 9. Simulación de la variación de tiempos de espera promedio y máximos en periodos de 1 hora bajo demanda de un domingo atípico



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico anterior (gráfico 9), relativo a los tiempos de espera en el día de máxima demanda, evidencian en manera aún más clara los dos horarios pico a las 11 y 16 horas, que corresponde a la máxima demanda en viaje de entrada y salida respectivamente. Si bien los tiempos de espera promedio quedan por la mayor parte del día en un rango aceptable entre 5 y 10 min., no es posible ignorar que algunos pasajeros tienen que esperar hasta más de 30 min. en horario pico. Para resolver esta limitación, en los apartados siguientes se consideraron a título de demostración, dos diferentes estrategias posibles, que pueden ser aplicadas de manera independiente o combinada: el aumento del número de vehículos y el aumento de la velocidad nominal durante los horarios y días de mayor demanda.

En el apartado anterior se identificó el periodo de 11 a 12 horas del domingo atípico como situación más crítica para la eficiencia del Autotrán propuesto para el Zoológico Guadalajara. En este apartado nos proponemos discutir el aumento del número de vehículos, originalmente planteado en 35, como estrategia para aumentar la capacidad del sistema y reducir los tiempos de espera. Los resultados que se muestran en la tabla siguiente, se refieren a una demanda horaria de 2.386 pasajeros, y una velocidad nominal constante de 5 m/s, al igual que el caso discutido en el apartado anterior.

Se consideraron los casos de 30 a 50 vehículos, con aumentos progresivos de 5 vehículos. En la tabla, además de los cuatro parámetros considerados en los casos anteriores, la variación de capacidad respecto de la simulación con 35 vehículos que se consideró como referencia.

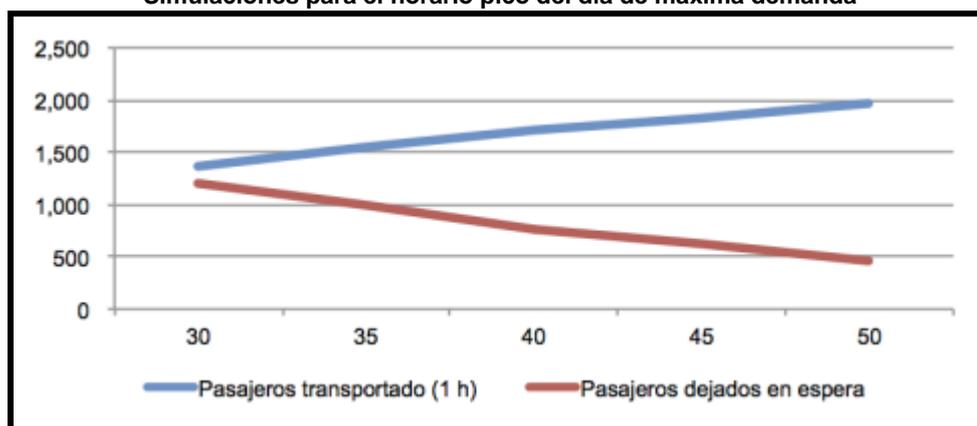


Cuadro 8. Resultado de simulaciones con diferente número de vehículos en hora pico del día de máxima demanda

Número de vehículos	30	35	40	45	50
Pasajeros transportados (1 h)	1,365	1,545	1,717	1,830	1,966
Pasajeros dejados en espera	1,194	984	773	634	458
Mayor capacidad (referida a 35 vehículos)	-12%	-	11%	18%	27%
Tiempo promedio de espera (min)	14.2	12.6	9.9	7.8	5.7
Tiempo máximo de espera (min)	37.7	31.4	24.6	19.4	15.8

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 11. Variación de capacidad al variar el número de vehículos del sistema. Simulaciones para el horario pico del día de máxima demanda

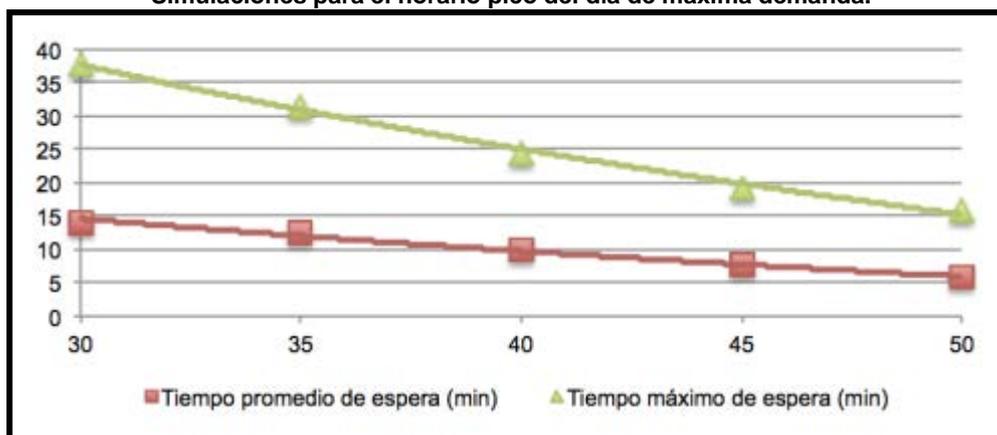


Fuente: Elaboración propia.

En la hora pico del domingo atípico, con un aumento progresivo de 15 vehículos – de 35 a 50 – se alcanza una mayor capacidad del sistema del 27%, mientras que el número de pasajeros dejados esperando al finalizar la simulación tuvo una reducción del 53%.

Finalmente, otro gráfico (gráfico 12), muestra cómo con la misma variación en el número de vehículos, es posible reducir los tiempos de espera promedio y máximos del 55% y 50% respectivamente.

Gráfico 12. Variación de tiempos de espera al variar el número de vehículos del sistema. Simulaciones para el horario pico del día de máxima demanda.



Fuente: Elaboración propia.

Una segunda estrategia considerada para resolver los problemas de eficiencia en la hora pico del domingo atípico, fue el aumento de la velocidad nominal de los vehículos. En la tabla y los gráficos que siguen, se muestran los resultados de simulaciones para la demanda horaria máxima, con un número de 35 vehículos constante.



Cuadro 9. Resultado de simulaciones con velocidades y número de vehículos constante, en hora pico del día de máxima demanda

Velocidad normal (m/s)	5	6	7	8	9	10
Velocidad promedio (km/h)	17	20	22	25	28	30
Pasajeros transportados (1 h)	1,545	1,743	1,837	2,028	2,097	2,156
Pasajeros dejados en espera	984	745	631	406	330	242
Mayor capacidad (referida a 5 m/s)	-	13%	19%	31%	36%	40%
Tiempo promedio de espera (min)	12.6	9.6	7.5	5.2	3.9	2.7
Tiempo máximo de espera (min)	31.4	23.9	19.5	13.2	10.6	8.1

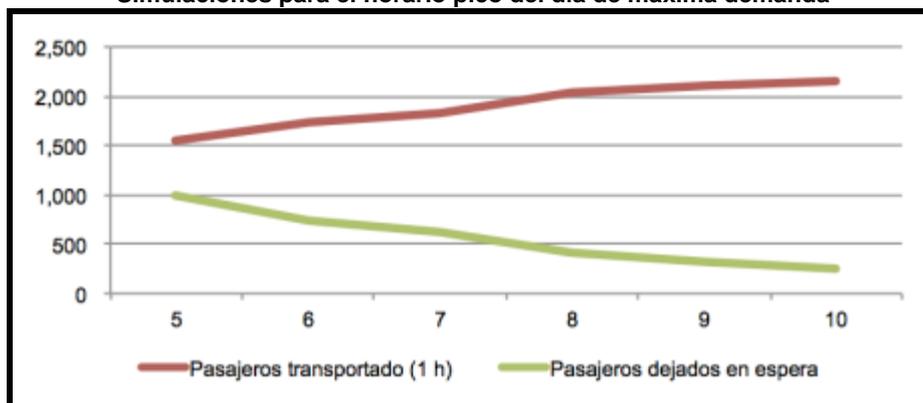
Fuente: Elaboración propia

Se hicieron simulaciones con velocidades entre 5 m/s – velocidad considerada como referencia para Autotrén en aplicaciones turísticas y recreativas – hasta 10 m/s, con aumentos progresivos de 1 m/s. En la tabla se muestra también la variación de capacidad respecto de la simulación con 5 m/s de velocidad nominal y la velocidad efectiva en km/h alcanzada por los vehículos en promedio durante la simulación.

Resultados de eficiencia comparables con el caso examinado en el apartado anterior para 50 vehículos, se pueden alcanzar con 35 vehículos y un aumento en la velocidad nominal de 3 m/s.

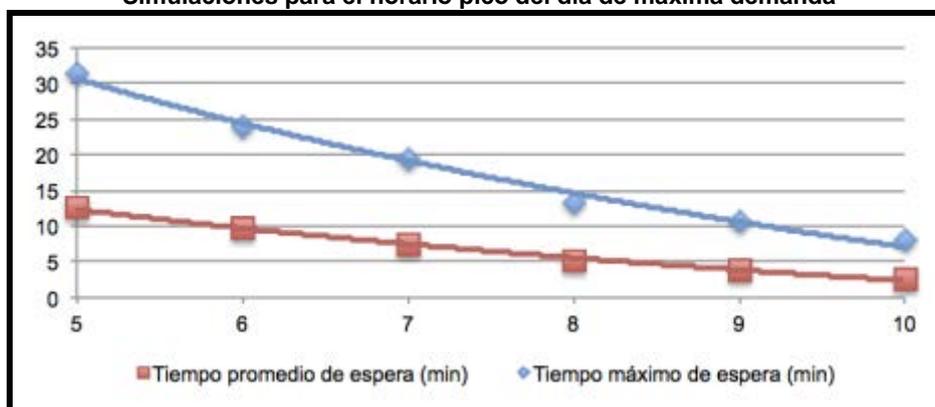
Con una velocidad establecida de 10 m/s, es posible obtener un aumento de la capacidad del sistema de un 40%, mientras que el número de pasajeros dejados en espera al terminar el periodo de simulación se reduce del 75%.

Gráfico 13. Variación de capacidad al variar la velocidad nominal de los vehículos del sistema. Simulaciones para el horario pico del día de máxima demanda



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 14. Variación de tiempos de espera al variar la velocidad nominal de los vehículos del sistema. Simulaciones para el horario pico del día de máxima demanda



Fuente: Elaboración propia.



Respecto de los tiempos de espera, al variar la velocidad de los vehículos, es posible reducir el tiempo máximo de hasta el 79% y el tiempo promedio del 74%.

Velocidades de 30 km/h pueden ser consideradas sin duda excesivas para una aplicación de este tipo, pero la simulación demuestra la máxima flexibilidad del Autotrén en ambientes con demanda muy variable como los parques temáticos.

La combinación de un aumento en el número de vehículos y en la velocidad de los mismos puede permitir al Autotrén aplicado al ZG de funcionar de manera eficiente y responder a un aumento en el número de visitantes a corto y mediano plazo, así como en caso de eventos extraordinarios.

3.7. Criterios para la adaptación de estaciones tipo

El sistema Autotrén cuenta con diversos prototipos de estación que atienden a los siguientes criterios: objetivo de la aplicación (urbana, turística, etc.), tipo de localización (a nivel de piso o aérea), nivel de demanda (estructura modular), tipo de cabina a utilizar (urbana con capacidad para 12 pasajeros, turística con capacidad para 4 pasajeros).

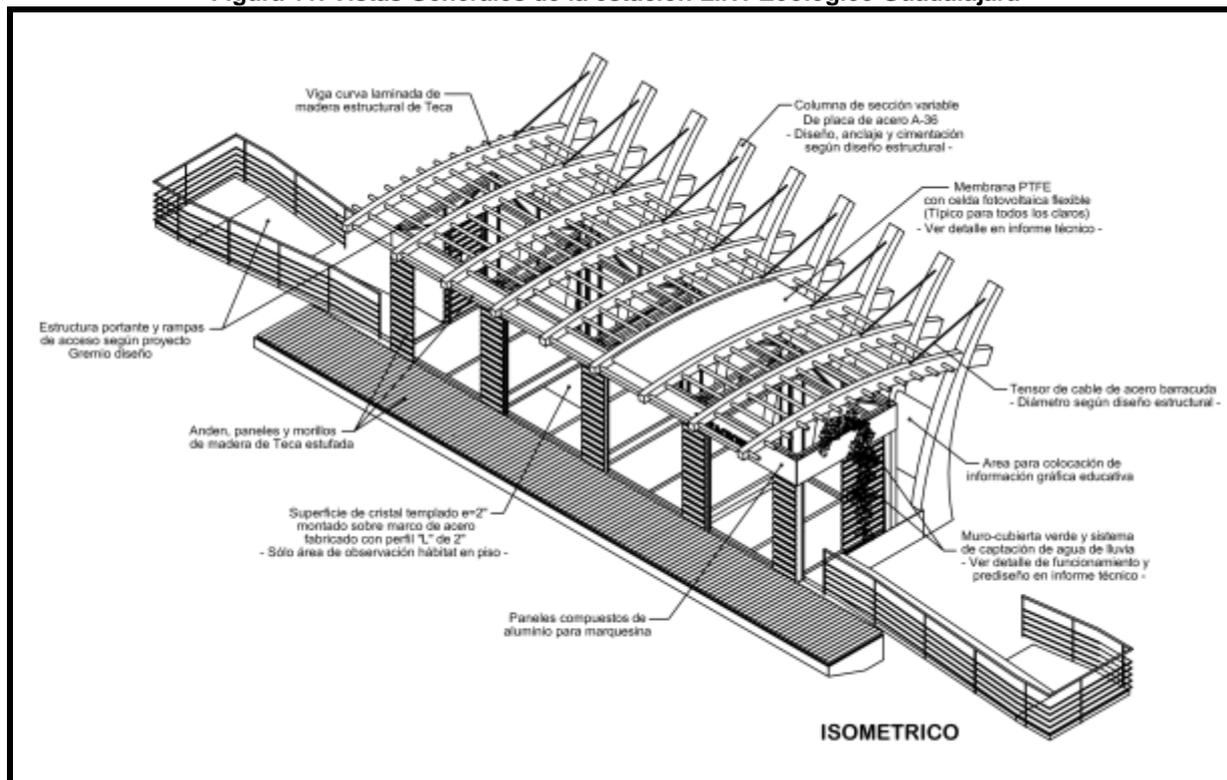
Los prototipos de estación para aplicaciones urbanas y turísticas fueron desarrollados por el despacho gremio diseño, a partir de una estructura modular, cuya flexibilidad permite una fácil adaptación al tipo de aplicación del sistema, y un montaje eficiente en términos de tiempo. La estación urbana se conceptualizó como un espacio seguro, funcional y exclusivo para usuarios del Autotrén. La estación turística se conceptualizó como un espacio seguro que fomenta la educación lúdica en interacción con los atractivos que fomenta el interés del turista.

Para el ZG La estación tipo se diseñó a partir del prototipo de la estación turística, que consideró de cuatro a seis módulos en atención a la demanda calculada por número de usuarios en cada estación. Debido a la configuración topográfica del terreno que ya hemos descrito (Olivares et al., 2011), las estaciones pueden encontrarse a nivel de piso, sobre una estación ya existente o ser aéreas.

La estación se conceptualizó como punto de aprendizaje haciendo énfasis en el aspecto lúdico. Durante el periodo de espera el usuario tendrá acceso a elementos que le permitirán conocer el entorno natural y los animales relacionados con el radio de influencia de la estación donde se encuentre. También se consideraron aspectos de educación y respeto hacia el medio ambiente, en ese sentido, el diseño de la estación incorpora una membrana PTFE de fibra de vidrio de larga duración y resistente a la intemperie, complementada con celdas fotovoltaicas preferentemente flexibles que se adhieren a la cubierta ajustándose a la forma y que permiten la captación de energía solar para la producción de electricidad que puede ser utilizada posteriormente, sin embargo, el enfoque principal en ese sentido es que el sistema de abastecimiento de energía pueda integrarse con un criterio modular a través de una planta eléctrica solar (Olivares et al., 2011). El ingreso y la estructura interior están cubiertos por un muro-techo verde que permite integrar la naturaleza al edificio, al tiempo de contemplar la implantación de un sistema de captación de agua de lluvia (Olivares et al., 2011). La forma en el diseño de la estación privilegia la utilización de la línea curva porque posibilita la integración armónica con el entorno natural, resulta más segura para el usuario y coadyuva a que se perciba como un lugar de protección y cobijo (Olivares et al., 2011).



Figura 11. Vistas Generales de la estación LINT Zoológico Guadalajara



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Vista estación Barranca del Autotrén en el Zoológico Guadalajara



Fuente: Elaborado a partir de relevamientos propios.



4. CONCLUSIONES

Los sistemas PRT y GRT cuentan con un largo periodo de estudio en diversos países de Europa y en los Estados Unidos, que se remonta a los años 50, con importantes avances en su propuesta tecnológica. Sus primeras aplicaciones, de esencia experimental, se centraron en resolver problemas de movilidad muy acotados, la mayor parte de ellos en complejos cerrados como hospitales, aeropuertos, ferias, etc.; otras pocas intentaron resolver problemas urbanos de movilidad con acontecimientos poco afortunados que frenaron su desarrollo.

Actualmente se pueden observar nuevas aplicaciones a cargo de empresas que han logrado comercializar los sistemas PRT/GRT, pero la mayor parte de ellas se observan en espacios cerrados, como la del Aeropuerto Internacional de Heathrow en Londres, y solo una aplicación urbana en Masdar City, ciudad del mundo árabe identificada como un experimento urbanístico sin precedentes.

En México se está desarrollando una tecnología de transporte basada en sistema PRT/GRT denominada Autotrén, la cual cuenta con una estación de prueba, y pretende plantear una propuesta acorde con el contexto latinoamericano, tanto en términos de rentabilidad -costo y rapidez en su instalación-, como en lo relativo a su diseño, donde se contemplan aspectos como la seguridad, referida a la integridad personal, la eficiencia en el tiempo de los traslados y la comodidad; así como otros aspectos de orden ambiental -emisión de gases y consumo de energía- y urbanístico, optimización del uso del espacio público, entre otros aspectos.

A partir de la hipótesis planteada, a continuación desarrollamos las conclusiones vinculadas al mapa de procesos propuesto para la aplicación del sistema Autotrén, tanto en parques temáticos como en espacios urbanos, con ejemplos detallados sobre la aplicación desarrollada en el Zoológico Guadalajara. Si bien pudiese parecer aventurado proponer un mapa genérico de procesos que también contemple aplicaciones urbanas, es necesario considerar que esta actividad forma parte de las estrategias para la realización de la aplicación urbana contemplada en un corredor importante de la ciudad de Guadalajara, que vincula la estación norte del Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR), con el núcleo de la Universidad de Guadalajara, donde se localiza el Centro Cultural Universitario y los Centros Universitarios de Ciencias Exactas e Ingenierías y Ciencias Sociales y Humanidades; con el centro tradicional de municipio de Zapopan.

El proceso para el estudio de demanda es un primer paso fundamental vinculado al dimensionamiento general del proyecto, al diseño de la red vial y a la localización y características de las estaciones. Para el caso de parques temáticos es factible realizar encuestas de preferencias que aporten información que ayude a estimar la demanda en cada nodo de actividad, como complemento de información elaborada por el propio parque sobre la demanda de visitantes en general y la preferencia de las amenidades. En el caso de aplicaciones urbanas se optó por un Estudio de Aforos de Ocupación Visual, considerado como un método rápido y confiable para estimar la demanda en nodos urbanos. Este método puede considerarse como un primer parámetro que nos permite evaluar la rentabilidad de la aplicación del autotrén.

En lo referente al proceso para el estudio de los aspectos topográficos, se partió de establecer las limitaciones técnicas del Autotrén para atender pendiente superiores al 15% y se describieron los mapas técnicos necesarios para su análisis. Las pendientes se analizaron en vinculación con los escurrimientos hidrológicos superficiales y las inundaciones de calles y se establecieron criterios para optar por una red vial área.



Respecto del proceso para el estudio del medio transformado, se analizaron de manera independiente las categorías y criterios para aplicaciones en parques temáticos y en espacios urbanos, ya que atienden diferentes objetivos de movilidad y niveles de complejidad. En el caso de los parques temáticos se abordó a partir de la zonificación y de la estructura conceptual planteada para zoológicos y su relación con la propuesta educativa y lúdica. Para el caso de la aplicación urbana se planteó con el objetivo de identificar el modelo de movilidad de la ciudad, a partir del conocimiento de su estructura material y funcional, así como de sus características sociales y culturales.

Se siguió el mismo principio para el proceso de diseño de la red vial, en lo relativo a la diferenciación del objetivo de movilidad y la consecuente especificación de los criterios para cada tipo de aplicación. En lo referente al diseño del tipo de vía se establecieron los criterios que en cada caso podían inclinar la balanza respecto de la elección entre una propuesta terrestre o una aérea.

En lo referente al proceso para el dimensionamiento y verificación del sistema, se consideró pertinente plantear una propuesta única, ya que el software de simulación requiere de idénticos insumos de información. Ya que lo que se evalúa es la eficiencia del sistema, los indicadores que definen dicha eficiencia y los criterios para su evaluación cambian para aplicaciones en parques temáticos y en espacios urbanos. Se ejemplificó en detalle el proceso a partir de la aplicación en el ZG, con la intención de enfatizar la necesaria retroalimentación feedback con los procesos anteriores. El mismo principio se siguió para el proceso de adaptación de las estaciones.

Podemos afirmar que la experiencia que nos dio la aplicación piloto del Autotrén en un parque temático nos permitió definir el conjunto de procesos para el desarrollo de aplicaciones también en espacios urbanos, con especificaciones técnicas que en cada proceso, se definieron para atender los diferentes objetivos de movilidad.

En este sentido, es conveniente destacar, que desde los primeros estudios y desarrollos de sistema PRT/GRT, se ha establecido la conveniencia de su aplicación para resolver problemas de movilidad en ciudades, sin embargo, su implementación se ha topado con diversos obstáculos entre los que destaca actualmente su percepción como una tecnología aún en proceso de desarrollo, en la cual es arriesgado invertir, por lo que se observan pocas aplicaciones en operación. Asimismo, es percibido, entre algunos planificadores urbanos, como un sistema de transporte que puede fomentar la dispersión espacial.

En términos técnicos es factible afirmar que, según diversos especialistas, las limitaciones tecnológicas del sistema han sido resueltas (Anderson, 2000; Department of Transportation Bureau of Reserch New Jersey, 2007), y que al igual que otros sistemas de transporte, su tecnología está en constante revisión y mejora. Por otro lado, por las características propias del sistema, su tecnología requiere una inversión menor que otros sistemas de transporte masivo, por lo tanto, es factible desarrollarla en países con escasos apoyos para la innovación, como es el caso de México y la mayor parte de los países de América Latina. Este seguramente es un factor positivo ya que no es necesario importar tecnología que muchas veces es inaccesible para economías en desarrollo, poco solventes.

Actualmente se observan diversas aplicaciones a cargo empresas que han logrado introducir la tecnología PRT/GRT en el mercado con resultados exitosos, como 2getthere, Ultra Global, entre otras. La mayor parte de estas aplicaciones, tanto en espacios cerrados como en áreas urbanas, se observan en países desarrollados, situación que puede perjudicar su aplicación en países con economías en desarrollo, sin embargo, países como India tienen ya en proceso un desarrollo para la ciudad de Amritsar.



Desde el punto de vista urbanístico, es evidente el proceso de dispersión con el que se ha extendido las ciudades más importantes de América Latina, configurando espacialidades que hacen poco rentable la introducción de sistemas de transporte masivo. Esto afecta, sobre todo, a los habitantes de las periferias, quienes, desde el punto de vista socio-económico, se encuentran entre las capas más empobrecidas de la sociedad, las cuales, paradójicamente, utilizan más el transporte público, el cual es generalmente ineficiente y costoso respecto de su calidad. En este sentido, consideramos que el Autotrén puede considerarse como opción que debe ser analizada.

Anderson, uno de los especialistas de mayor experiencia en el estudio de los sistemas PRT/GRT, afirmaba en el año 2000 estar convencido de que este es un sistema que puede ayudar a resolver los problemas de movilidad del siglo XXI⁶.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el financiamiento del CONACYT, a través de la convocatoria PROINNOVA, para desarrollo del proyecto *Desarrollo de un Sistema de Transporte Urbanos Automatizado Sustentable – Etapa 2*. Asimismo a la empresa Modutram México S.A de C.V. y al Consorcio AERI por haber convocado la participación de la Universidad de Guadalajara a colaborar en dicho proyecto.

También destacamos la colaboración de los asesores del proyecto: Ingmar Andréasson del Centre for Traffic Research del Royal Institute of Technology; Carme Miralles-Guash del Instituto de Estudios Regionales y Metropolitanos de Barcelona de la Universidad Autónoma Barcelona; Josep Roca Cladera, Carlos Marmolejo y Blanca Arellano del Centro de Política de Suelo y Valoraciones (CPVS) de la Universidad Politécnica de Cataluña.

BIBLIOGRAFIA

ANDERSON, Edward. 2000. A review of the state of art of personal rapid transit. *Journal of Advanced Transportation*, vol 34 n° 1, p. 3-29.

ANDRÉASSON, Ingmar. 2009. Extending PRT Capabilities. *Proceedings of the 12th APM Conference*, Atlanta, Georgia.

ANDRÉASSON, Ingmar. 2001. Innovative Transit Systems. Survey of current developments. INNOVA Report.

BANCO MUNDIAL. 2002. Ciudades en movimiento: revisión de la estrategia de transporte urbano del Banco Mundial.

BERNASCONI, Claudia; STRAGER, Michael P.; MASKEY, Vishakha; Hasenmyer, Michael. 2009. Assessing public preferences for design an environmental Attributes of an urban automated transportation systems. *Landscape an Urban Planning* vol 90, n° 3-4, p. 155-167. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204608001862>

COLLADOS Sariego, Gustavo 1997. El rol de los zoológicos contemporáneos. Universidad Central de Chile.

COE, Jon . 2005. The Unzoo alternative. ARAZPA/SEAZA Joint Conference. Hong Kong: ARAZPA/SEAZA Joint Conference.

DEPARTAMENT OF TRANSPORTATION USA. 1977. Review of downtown people mover proposals: preliminary market implications for downtown Applications of automated guideway transit. Washington D.C. <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015040683586;page=root;seq=3;view=1up;size=100;orient=0>

⁶ I was increasingly impressed that PRT could will be a solution to urban problems such as congestion, air pollution, accidents, lead poisoning, noise, the division of communities by introduction of urban freeways, the ever increasing land required to accommodate automobiles, and the inequality in access to jobs and services between those who drive and those who either cannot or should not drive. I had been involved in a year-long Citizens League committee formed to study transit alternatives and found thereby that conventional rail systems were cost effective only in cities of much greater densities than occur in the neighborhoods of single-family homes that had been developing for many decades and cover vast portions of the urban landscape.” (Anderson, 2000:3-4)



DEPARTMENT OF TRANSPORTATION BUREAU OF RESEARCH NEW JERSEY.2007. Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey.

IRVING, Jack H., BERNSTEIN, Harry, OLSON C.L., BUYAN Jon. 1978. Fundamentals of Personal Rapid Transit. Lexington Mass, Lexington Books, DC, Heath and Company.

KYLLMAN, Alexander. 2011.Requerimiento de para el Sistema Vehicular. MME-00003. En Especificación de Requerimientos Sistema de Transporte Flexible en Red Inteligente. Guadalajara, Jalisco, México: ModuTram México S.A. de C.V.

KYLLMAN, Alexander. (2011a).Requerimiento de para el Sistema Vial. MME-00002. En Especificación de Requerimientos Sistema de Transporte Flexible en Red Inteligente. Guadalajara, Jalisco, México: ModuTram México S.A. de C.V.

LOZANO, Angélica, MACIAS, Luis; GUARNEROS, Lizbeth; ALARCÓN, Rodrigo; LOPEZ, David; GRANADOS, Francisco; GUZMAN, Alejandro; ALONSO, Andrés; ANTÚN Juan Pablo; MAGALLANES, Roberto. 2010. Sistema de Transporte Urbano Automatizado Sustentable (PRT). Identificación de las condiciones en las que el PRT podría ser de utilidad en México. Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales. Ciudad de México, UNAM, Mimeo.

MIRALLES, Carme. 2011. Recomendaciones para la implantación de sistemas de transporte PRT/GRT en Olivares A., Cordova, F.; De Paolini, M. Informe técnico de Proyecto de Aplicación. En el Zoológico Guadalajara del Sistema LINT. Guadalajara, Jalisco, México, Alianza Estratégica y Red de Innovación para Sistemas Avanzados de Transporte Urbano Sustentable, Mimeo.

MARMOLEJO, Carlos. 2011. Recomendaciones para la implantación de sistemas de transporte PRT/GRT en Olivares A., Cordova, F.; De Paolini, M. Informe Técnico de Proyecto de Aplicación en el Zoológico Guadalajara del Sistema LINT. Guadalajara, Jalisco, México, Alianza Estratégica y Red de Innovación para Sistemas Avanzados de Transporte Urbano Sustentable, Mimeo.

OLIVARES, Adriana; GONZÁLEZ, Daniel; PÉREZ, María; RUIZ, Omar; PEREDO, Alberto. 2011. Informe Técnico de Proyecto de aceptación-adopción de la tecnología LINT en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Alianza Estratégica y Red de Innovación para Sistemas Avanzados de Transporte Urbano Sustentable, Mimeo

PENGJUN, Zheng; JEFFERY, David; MCDONALD, Mike. 2009. Development and evaluation of traffic management strategies for PRT. Proceedings of the Industrial Simulation Conference, Loughborough UK.

PRT CONSULTING. 2011. Brazil: Bold project in Teresina provides cabins carrying passengers. <http://prtconsulting.com/news.htmlconsulta> 03 marzo 2013.

SZYLIOWICZ, Joseph. 2003. Adopción de decisiones, transporte multimodal y movilidad sostenible: hacia un nuevo modelo. Revista Internacional de Ciencias Sociales. Movilidad Sostenible, nº 176, p. 7-23.

TEGNER, Göran; HUNHAMMAR, Magnus; ANDRÉASSON, Ingmar; NOWACKI, Jan-Erik, DAHLSTRÖM, Kjell. 2007. PRT in Sweden. From feasibility studies to public awareness.11th International Conference on Automated People Movers, Vienna.

TEGNER, Göran; HENNINGSSON, Janne; PERSSON, Stefan; NILSON, Michael; ANDRÉASSON, Ingmar; SELIN, Nils-Erik. 2001. Huddinge Site Assessment Report. European Comisión DG Research, Evaluation and demonstration of innovative city transport. EDICT Project nº: EVK4-CT-2001-00058.

YANEZ, Laura, COLLADOS, Gustavo, y HARRISON, Bernard. 2005. Visitor circulation in zoos. Design Workshop "The Principles of Zoo Design and the Planning of a Night Safari". Melbourne, Australia: SEAZA/ARAZPA Joint Conference "The Art and Science of Zoos"

ULRICH, Karl. YEPPINGER Steven.2004. Diseño y desarrollo de productos. Enfoque multidisciplinario. Tercera Edición. México D.F.: Mc Graw Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.



Daniel González

Doctor en Arquitectura y Urbanismo (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España). Docente e investigador de la Universidad de Guadalajara. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Fue director de la Comisión de Planeación Urbana del Municipio de Guadalajara y coordinador del doctorado en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad (Padrón Nacional de Posgrados del CONACyT) en México. Coordinador de investigaciones en movilidad y análisis metropolitano. Profesor y conferencista en diversas universidades de Europa y América Latina.

Adriana Olivares

Doctora en Arquitectura y Urbanismo (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España). Docente e investigadora de la Universidad de Guadalajara, México. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Coordinadora de la maestría en Procesos para la Proyección Arquitectónica Urbana (Padrón Nacional de Posgrados del CONACyT). Coordinadora de investigaciones en movilidad y análisis urbano-regional con artículos en revistas especializadas.

Fernando Córdova

Doctor en Arquitectura (Universidad Nacional Autónoma de México). Docente e investigador de la Universidad de Guadalajara. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Coordinador y corresponsable de diversos proyectos de investigación en materia de movilidad y análisis arquitectónico y urbano ambiental, con publicaciones en revistas especializadas.

Marco De Paolini

Doctorante en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad (Universidad de Guadalajara). Docente e investigador asociado de la Universidad de Guadalajara, México. Corresponsable de diversas investigaciones en materia de movilidad y análisis urbano, regional y ecológico, con publicaciones en revistas especializadas.