

**MASTER PROFESIONAL EN INGENIERÍA Y GESTIÓN  
MEDIOAMBIENTAL 2008 – 2009**

**PERSONAL RAPID TRANSIT,  
IMPACTO AMBIENTAL  
EN EL PARQUE DE VALDEBEBAS, MADRID:  
REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES  
CONTAMINANTES**

**ÁLVARO ROSALES VALLEJO**

## ÍNDICE

1. Descripción y conceptos del sistema PRT .....	3
2. Historia y momento actual del PRT .....	5
2.1. Situación actual:.....	9
3. Historia, evolución y situación actual del transporte en Madrid .....	10
3.1. Introducción .....	10
3.2. Histórico y situación actual: Estudio de movilidad .....	12
4. Trazado de la red, capacidad de pasajeros y consumo energético.....	19
4.1. Trazado de la red.....	19
4.2. Capacidad de pasajeros .....	21
4.3. Consumo energético .....	23
5. Impacto Ambiental .....	24
5.1. Base Legal .....	24
5.2. Impacto de la emisiones contaminantes .....	24
5.2.1. Modelo de emisiones .....	27
5.2.1.1. Introducción.....	27
5.2.1.2. Contaminantes .....	28
5.2.1.3. Emisiones del arranque en frío o Cold Start Emissions .....	30
5.2.2. Metodología.....	32
5.2.3. Resultados.....	41
5.3. Impacto visual .....	49
5.4. Impacto sonoro y niveles de ruido.....	50
5.5. Impacto en Flora y Fauna.....	51
5.6. Impacto en el uso del suelo .....	51
5.7. Impacto social .....	51
5.7.1. Mejora del tiempo de trayecto.....	52
5.7.2. Mejora de la seguridad vial .....	52
5.8. Impacto económico.....	53
6. Análisis y conclusiones .....	55
7. Referencias y bibliografía .....	57

## 1. Descripción y conceptos del sistema PRT

A pesar de que se pueden encontrar diversas definiciones dependiendo del diseño y características de los diferentes modelos existentes de PRT, se agrupan más abajo un grupo de elementos comunes a todos ellos:

- **Sin paradas:** Servicio directo de origen a destino, sin necesidad de transferencia o paradas en estaciones intermedias.
- **Bajo demanda:** Sistema vehicular dinámico, transportando bajo demanda y no en horarios fijos.
- **Individualizado:** Vehículos reducidos disponibles para uso individual o en grupo, normalmente de 1 a 6 personas, viajando de forma conjunta por elección con protección en el interior.
- **Automático:** Vehículos completamente automáticos capaces de operar sin conductor y disponibles 24 horas, 7 días a la semana, 365 días al año.
- **Vial exclusivo:** Vehículos que circulan por un carril de forma exclusiva.
- **Vial ultra-ligero:** Carriles que pueden ser ubicados elevados, al nivel del suelo o subterráneos.
- **Estructura por módulos:** Vehículos capaces de usar todos los carriles y estaciones de una red integrada por diferentes módulos.
- **Estaciones fuera de línea:** Las estaciones se encuentran fuera del carril principal, evitando cualquier interferencia con el mismo.

Item	Metro urbano				
	PRT	Metro	Metro Ligero	BUS	TAXI
<b>Operativa</b>	Bajo demanda Sin paradas	Horario Con paradas		Horario Con paradas	Bajo demanda
<b>Distancia entre estaciones</b>	200m	1,000m	800m	200m	-----
<b>Área de servicio</b>	Red	Línea	Línea	Línea	Sin límite
<b>Velocidad media</b>	45-60km/h	25-35km/h	25-35km/h	15-20km/h	30km/h
<b>Tiempo entre vehículos</b>	2.5 seg	2-5 min	1-2 min	5 min	-----
<b>Costes constructivos</b>	7.7 M €/km	70M €/km	42M €/km		-----
<b>Personal operativo</b>	Sin conductor	Conductor	Conductor	Conductor	Conductor
<b>Disponibilidad</b>	24/7	Limitada	Limitada	Limitada	24/7
<b>Coste al usuario</b>	Económico	Económico	Económico	Económico	Caro
<b>Calidad del servicio</b>	Excelente	Nominal	Nominal	Nominal	Excelente

Tabla 1. Comparativa de las características de diferentes modos de transporte. Fuente: elaboración propia

**- Características del PRT desarrollado por VECTUS, empresa surcoreana<sup>1</sup>**

<i>Capacidad por vial</i>	1200 vehículos/hora por vial a 45 km/h, 4 pasajeros/vehículo
<i>Tiempo entre vehículos</i>	1 - 2,5 seg.
<i>Capacidad por estación</i>	Dependiendo del número de andenes, 460 pasajeros/h
<i>Velocidad</i>	30 - 60 km/h
<i>Consumo energético</i>	660 vatios/h por vehículo - kilómetro a 45km/h
<i>Velocidad máx. del viento</i>	Operativa normal hasta 45km/h. Menor rendimiento en ráfagas hasta 30m/s
<i>Operativa climatológica</i>	Operativa normal bajo lluvia, nieve y granizo
<i>Disponibilidad</i>	24 horas al día, bajo demanda
<i>Accesibilidad a estación</i>	Estación cada 300 – 500 m.
<i>Accesibilidad minusválidos</i>	Rampa y ascensor, plataforma plana Puertas amplias y espacio para silla de ruedas
<i>Tiempo de espera</i>	En servicio de baja demanda insignificante En servicio de alta demanda no más de 1 min.

## 2. Historia y momento actual del PRT

El origen del concepto PRT se le atribuye a Don Fichter, estadounidense experto en planificación de transporte urbano, quien publicó en 1964 el libro *“Individualized Automated Transit in the City”*.

Un importante número de los estudios conocidos sobre la viabilidad del sistema PRT se remontan a 1966, cuando un estudio del Departamento de Vivienda y Desarrollo Urbano de EEUU (Department of Housing and Urban Development – HUD) recomendó enérgicamente este modo de transporte en su informe *“Tomorrow’s Transportation”*.

El citado informe supuso el impulso de un esfuerzo general por investigar sobre los sistemas PRT al comienzo de la década de los 70, de hecho, buena parte de la base matemática analítica sobre este modo de transporte fue desarrollada en esa década.<sup>2</sup>

A comienzos de este periodo, finales de los años 60, una corporación independiente y sin ánimo de lucro establecida por el Congreso de los Estados Unidos, con el nombre de *Aerospace Corporation*, dio los primeros pasos en el diseño teórico y análisis de los sistemas PRT. Debido a que la corporación no disponía de autorización para vender dichos trabajos a clientes no gubernamentales, no fue posible un desarrollo más completo de estos primeros trabajos fuera del entorno de la misma.

No obstante, ello no supuso la pérdida irremediable de la información, ya que miembros del equipo de investigación publicaron en 1969 en la revista científica *Scientific American*, un ensayo sobre los fundamentos del sistema PRT, titulado *“Fundamentals of Personal Rapid Transit”*.

Casi simultáneamente, nacían también proyectos relacionados con el mismo concepto en el continente europeo.

En Francia, en 1967, se dio a conocer el proyecto *Aramis*, gestionado por la empresa *Matra*, una importante empresa de alta tecnología especializada en aplicaciones militares, de transporte y telecomunicaciones. Dicha compañía gastó más de 400 millones de francos, alrededor de 60 millones de euros intentando demostrar y desarrollar el concepto PRT<sup>3</sup>, siendo la mayor contribución económica administrada por la empresa gestora del sistema de transporte regional de París, la RATP. En el proyecto se construyeron y desarrollaron varios test de prototipos y diferentes pruebas de sistemas con diverso éxito. Como resultado

de numerosos fallos técnicos y falta de coordinación estratégica, la RATP decidió suspender la financiación y el respaldo al proyecto.

Finalmente, debido a la falta de apoyo público, la empresa MATRA descartó el proyecto *Aramis*, dándolo por finalizado en 1987.<sup>4</sup>

Siguiendo la estela del histórico y las experiencias europeas sobre los sistemas PRT llegamos a Alemania, donde se desarrolló el sistema denominado *Cabintaxi*, entre la década de los 70 y los 80, en la ciudad de Hamburgo, siendo considerado como uno de los proyectos sobre los sistemas PRT que llegó a obtener mayor presupuesto económico.

Las empresas involucradas en este proyecto fueron Mannesman Demag y MBB. Desafortunadamente, una crisis económica forzó el recorte presupuestario al proyecto por parte del gobierno alemán, lo que provocó automáticamente la cancelación definitiva del mismo<sup>5</sup>.

La versión británica, *Cabtrack*, comenzó en los años 60, cuando L.R. Blake, autor de la idea, se la vendió a la empresa donde trabajaba, Brush Electric Company. El proyecto recibió apoyo y financiación por parte del Gobierno británico.

A la finalización de los estudios preliminares, se construyó un modelo a escala 1:5, el cual facilitó la realización de un estudio técnico exhaustivo, así como el análisis sobre la disposición de la red y factores de demanda del servicio.

En 1971 se publicaron en *Architect's Journal* los resultados de un estudio llevado a cabo en Londres sobre el impacto visual de los viales elevados para sistemas de transporte automático.

Finalmente, debido a un cambio de gobierno el proyecto *Cabtrack* fue interrumpido y enterrado.

Como reafirmación del interés internacional en los sistemas PRT podemos encontrar proyectos de desarrollo en Japón en los años 70. El sistema se denominó *Computer-controlled Vehicle System, CVS*. Se realizaron extensivos planes y costosos estudios que dieron como resultado la construcción de una pista de pruebas con 60 o 84 vehículos en funcionamiento, dependiendo de la fuente, así como un vial de 4.8 km de longitud. Diversos fallos de diseño produjeron resultados negativos que desembocaron en la pérdida de apoyo gubernamental y consecuente abandono del proyecto.

Desde 1975, en la Universidad de West Virginia, situada en Morgantown, West Virginia, EEUU, ha operado un sistema al que hasta en fecha reciente se le denominaba como el único sistema comercial PRT en funcionamiento. No obstante, existe cierta polémica sobre si puede ser considerado como un sistema PRT, ya que no cumple con todos los requisitos que hoy en día definen a estos sistemas bajo el criterio de la *Advanced Transit Association (ATRA)*, como un servicio sin paradas intermedias desde origen a destino.

Aunque el sistema transporta a 15.000 personas al día, su diseño reduce la capacidad de transporte en comparación con verdaderos sistemas PRT y posee unos costes por m<sup>2</sup> mayor que otros sistemas.<sup>6</sup>

Más recientemente, en la década de los años 90, la empresa alemana Raytheon, con intereses en EEUU, desarrolló un sistema PRT denominado *Taxi2000*.

Dicha compañía se adjudicó un contrato con la *North-eastern Illinois Regional Transportation Authority* para la instalación de un sistema de transporte basado en el concepto PRT, en la ciudad de Rosemont, Illinois, EEUU.

El proyecto fue un fracaso, y después de modificaciones el diseño el sistema fue renombrado como *PRT2000*. En 1999, la empresa Raytheon anunció su retirada del mercado y la empresa británica York PRT adquirió la licencia para la explotación comercial del sistema, si bien los derechos tecnológicos del mismo fueron devueltos al desarrollador original, la Universidad de Arizona, siendo finalmente adquiridos por una nueva empresa, con el nombre de *Taxi2000*.

Diversas empresas y proyectos relacionados con el concepto de transporte automático, en mayor o menor medida cercanos al concepto PRT, han desarrollado sus propios sistemas con más o menos éxito. Sin embargo, en esta introducción al concepto de transporte PRT, se considera que no es apropiado cargar al lector con una interminable lista de nombres aleatorios e historias particulares detalladas de relativa poca importancia para conseguir el objetivo de ofrecer una idea general e histórico sobre cómo los sistemas PRT han evolucionado desde los tempranos orígenes del concepto.

Por otro lado, no se puede evitar remarcar la increíble diversidad y flexibilidad de algunos de estos sistemas. En este contexto, son dignos de mención diferentes tecnologías que han sido aplicadas a diseños alternativos; la levitación magnética en el sistema *UniModal* o

*Skytran*; vehículos suspendidos en vez de vehículos soportados del sistema sueco *FlyWay*, etc.

Las razones por las cuales estos sistemas no continuaron con su desarrollo o posterior implementación son difíciles de evaluar, debido a que no se han publicado estudios lo suficientemente exhaustivos al respecto. Sin embargo, algunos de los motivos básicos quizás se puedan encontrar relacionados con problemas técnicos, falta de demanda percibida, inquietudes sobre su rentabilidad, cambios de las prioridades entre transportación e investigación, falta de apoyo gubernamental, y dudas sobre posibles reacciones adversas del público. En particular, algunas de las críticas específicas elevadas en el pasado al concepto PRT han sido las siguientes:

- Un sistema PRT no será capaz de proveer la capacidad de transporte de pasajeros requerida para un funcionamiento eficaz en las horas punta.
- Estos sistemas requieren de una infraestructura compleja, con control de guiado electrónico, que serán únicamente viables en rutas con altas tasas de pasajeros.

Sin embargo, hoy en día, la potencia computacional basada en la informática permite una mejora sustancial en la capacidad para la simulación de modelos y la capacidad de diseño de una red de transporte. La teoría sobre el control de sistemas de transporte automático combinada con la potencia computacional permite la simulación y posterior comparativa de las consecuencias en una red de transporte automática hipotética.

La tecnología basada en los motores de inducción lineal o “LIM” por sus siglas en inglés, ha conseguido un alto estado de desarrollo tecnológico. Con el uso de esta tecnología se podrán reducir los tiempos de tránsito por viaje de una manera segura y eficaz.

El uso de la tecnología de tarificación automática servirá para simplificar la tarificación y reducir sus costes.

Estas observaciones, combinadas con la necesidad creciente de mejorar el servicio que los sistemas de transporte público brindan hoy en día, sugieren que los sistemas PRT sean estudiados y considerados como un realístico nuevo modo de transporte.

## 2.1. Situación actual:

Los sistemas PRT están presentes a nivel mundial. Se estima que unos 85 proyectos se han desarrollado y están bajo desarrollo. De estos, los más representativos se incluyen en la siguiente lista:

- **ULTra:** Consorcio entre la Universidad de Bristol, Reino Unido, y diversas empresas de ingeniería que ha recibido financiación del programa EDICT. ULTra construyó una pista de pruebas en la ciudad de Cardiff, Gales, que recibió una crítica positiva de los usuarios en su periodo de pruebas. Es el primer sistema PRT convencional implantado a nivel comercial, su instalación se ha realizado en el aeropuerto de Heathrow, Londres.
- **Vectus – Posco:** Empresa surcoreana que ha desarrollado una pista de pruebas a escala en la ciudad de Uppsala en Suecia, certificada por la Asociación Nacional Sueca del Ferrocarril.  
Ha firmado un contrato de intenciones para instalar un sistema real en la ciudad de Suncheon, en Corea del Sur.
- **2getthere:** Empresa holandesa que junto con la empresa italiana Zagato, han desarrollado un sistema PRT en la ciudad de Masdar, en Abu Dhabi. Este proyecto se encuentra en la primera fase del proyecto que conecta con el Instituto de Ciencias y Tecnología de Masdar, MIST por sus siglas en inglés.
- **Metra System:** Grupo de desarrollo que está impulsando la creación e instalación de un sistema PRT en España.

### **3. Historia, evolución y situación actual del transporte en Madrid**

#### **3.1. Introducción**

El objetivo de este proyecto es realizar un análisis aproximado del resultado derivado de la implementación de un sistema PRT en un área específica. Bajo esta premisa se debe tener en consideración la limitada capacidad de análisis de este proyecto, estudios completos de viabilidad requieren del trabajo de un equipo multidisciplinar integrado por varias funciones: técnica, urbana, planificación, transporte y política, todas ellas bajo coordinación oficial.

Más allá, este tipo de proyectos con la escala y amplia área de estudio que este proyecto propone son llevados a cabo por importantes empresas de ingeniería o consultores de transporte con un significativo presupuesto y tiempo para ello.

Por lo tanto, como proyecto de Máster a lo que aspira es a presentar una estimación aproximada sobre las consecuencias en un área específica.

El objetivo del proyecto es ser un paso anterior para considerar un estudio a escala real que requerirá la experiencia y esfuerzo de un equipo técnico multidisciplinar con la involucración de las autoridades locales, en el que la Escuela de Organización Industrial podría participar aportando su potencial analítico y técnico.

El sistema PRT propuesto aspira a interactuar bajo una premisa intermodal.

Se entiende que las opciones de transporte actuales están cubiertas con los modos de transporte existentes. El objetivo del sistema PRT sería complementar y suplementar los servicios de transporte existentes en el ámbito urbano, es decir, se encontraría integrado en la de transporte público actual alimentando la red desde puntos de origen dispersos. El sistema PRT permitiría la reducción del uso del vehículo privado para el acceso/salida de la zona planteada, reduciendo a su vez los efectos negativos asociados como son la congestión del tráfico, emisiones de gases, ruido, accidentes, estrés o capacidad de aparcamiento y por lo tanto permitirá una mejor calidad de vida.

En este contexto, la elección del ámbito de aplicación donde se plantea una hipotética e inicial instalación del sistema PRT es en el área noreste de la ciudad de Madrid.

Madrid capital está dividida en 21 distritos: Arganzuela, Barajas, Carabanchel, Centro, Chamartín, Chamberí, Ciudad Lineal, Fuencarral-El Pardo, Hortaleza, Latina, Moncloa-Aravaca, Moratalaz, Puente de Vallecas, Retiro, Barrio de Salamanca, San Blas, Tetuán, Usera, Vicálvaro, Villa de Vallecas y Villaverde.

De entre estos distritos el área de estudio está centrada entre los distritos de Hortaleza y Barajas, concretamente en el reciente desarrollo urbanístico de la Ciudad Aeroportuaria Parque de Valdebebas.

La selección de esta área ha sido motivada por varios factores:

- Aumento previsto del tráfico, en vías con incidentes de congestión actuales, asociado a los distintos usos previstos en el proyecto: residencial, terciario, comercial, dotacional privado y público.
- Ámbito geográfico de estudio limitado, donde la incidencia de la intermodalidad de un sistema PRT con otros modos de transporte potencia la reducción del uso del vehículo privado.
- Plan urbanístico en fase de desarrollo, lo que permite una visión más real de implantación de un sistema PRT.

En la siguiente sección se presenta un análisis de la situación actual del tráfico rodado y cómo un estudio de movilidad nos ayudará a entender las consecuencias de un incremento en el mismo originado con el nuevo desarrollo urbanístico del Parque de Valdebebas.

### 3.2. Histórico y situación actual: Estudio de movilidad

Con el objetivo de construir un estudio de movilidad realístico y útil, los pasos a tomar deben incluir un sondeo detallado a lo largo del ámbito de implantación del sistema PRT: Parque de Valdebebas, así como del área circundante que se verá influenciada por este nuevo desarrollo: accesos al centro de Madrid por las vías de alta capacidad: A-1 y A-2; aumento del tráfico en los tramos de las vías que darán acceso a Valdebebas: M-40, R2, M-11, M-12.

Estos valores de deberán incluir la modelización de los accesos y salidas de los usuarios:

- Área de origen del usuario.
- Número de usuarios.
- Distribución horaria.
- Puntos de destino.

Este estudio de movilidad suministrará la información requerida para definir las características específicas para maximizar la eficiencia en el diseño de un sistema PRT. Por lo tanto, la información recogida y analizada permitirá decidir:

- Número de vehículos PRT o pods con los que deberá contar el sistema.
- Eficiente distribución del vehículo o pod en la red del sistema para dar servicio a las estaciones en relación a la demanda de los usuarios en cada momento y sección de la red.
- Ubicación de las estaciones en base a una alta o baja demanda por parte de los usuarios potenciales.

Con el objetivo de crear un punto de inicio para potenciales estudios a mayor escala se desarrollará esta estimación de movilidad con la información obtenida en gran parte de las siguientes fuentes:

- *Estudio de tráfico del Plan Parcial Ciudad Aeroportuaria Parque de Valdebebas.*
- *La congestión en los corredores de acceso a Madrid (Enero 2009)*
- *Atlas de la movilidad residencia-trabajo en la Comunidad de Madrid 2010*
- *Informe del Observatorio de la Movilidad Metropolitana – 2008*
- *Efectos sobre la movilidad de la dinámica territorial de Madrid*

En primer lugar hay que tener en cuenta la evolución de la población residente en la Comunidad de Madrid, que ha aumentado significativamente en la corona metropolitana, como se observa en la figura 1. Este hecho junto con la tendencia de dispersión de la localización del empleo produce “un cambio en las pautas de movilidad hacia una mayor dependencia del coche y una necesidad de realizar viajes mas largos”<sup>7</sup>

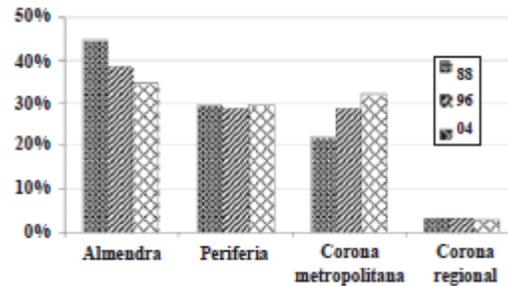
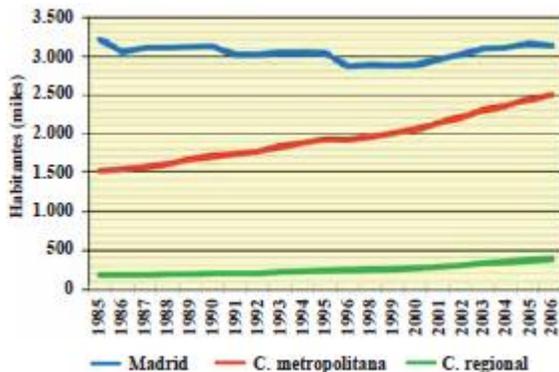


Figura 1. Evolución de la población residente en la CAM<sup>7</sup> Figura2. Distribución de empleos en la Comunidad de Madrid<sup>7</sup>

El número de desplazamientos en día laborable comparando la encuesta de movilidad de Madrid 2004 (EDM04, CRTM 2006) ha incrementado con respecto a la encuesta de 1996 (EDM96, CRTM 1998) en un 38.6%. El crecimiento de población es el factor más importante, pero no el único, ya que la movilidad diaria por persona se ha incrementado entre las mencionadas encuestas del 2,16 al 2,6. El incremento de desplazamientos entre la corona metropolitana y la periferia ha aumentado en un 37.4%, como se muestra a continuación en la figura 3 y representan el mayor volumen de viajes realizados.

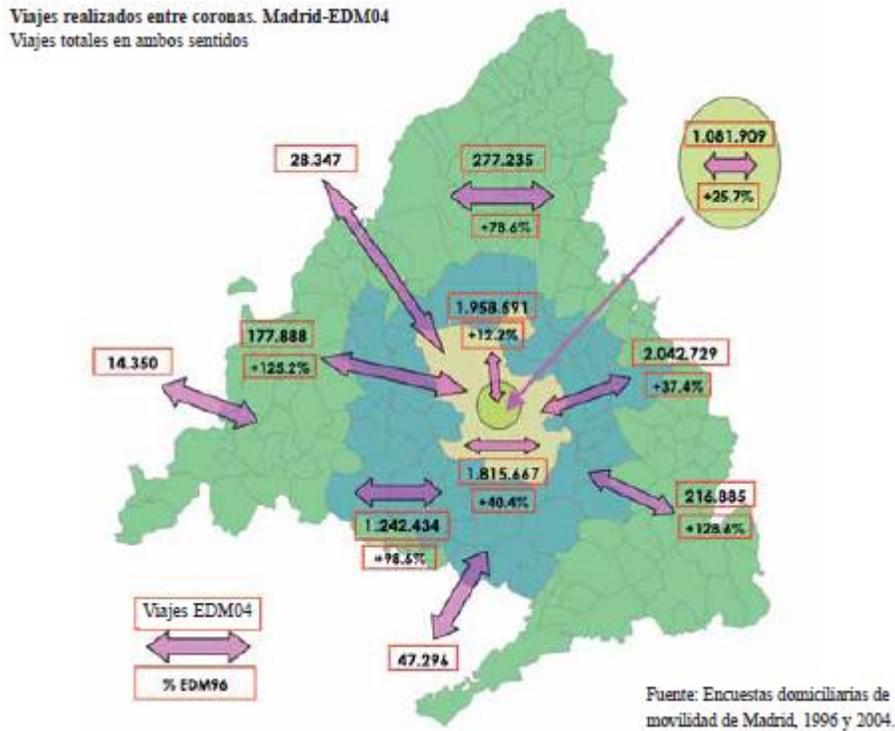


Figura 3. Crecimiento de la movilidad por relaciones en la Comunidad de Madrid.<sup>7</sup>

Al mismo tiempo que aumenta el número de desplazamientos aumenta la distancia media recorrida en los viajes tanto en los obligados (trabajo, estudios) como en los no obligados (compras, ocio, visitas, etc.) como se muestra en la figura 4. De especial relevancia para el área de Valdebebas son los de los corredores A-1 y A-2 que aumentan un 27% y un 20% respectivamente.

Corredor	Movilidad total			Movilidad obligada			Movilidad no obligada		
	EDM96	EDM04	% DIF	EDM96	EDM04	% DIF	EDM96	EDM04	% DIF
A-I	9,0	11,5	27%	10,6	13,8	31%	6,2	8,4	37%
A-II	6,9	8,3	20%	8,3	11,0	32%	3,9	5,1	29%
A-III	9,2	10,1	10%	10,6	12,3	16%	6,0	7,1	19%
A-IV	6,6	8,8	33%	7,4	11,7	58%	4,7	5,4	15%
A-V	6,2	8,3	35%	7,7	10,9	42%	3,9	5,2	53%
A-VI	12,2	12,3	1%	13,3	15,0	13%	9,4	8,7	-8%
Colmenar	10,4	12,4	18%	13,3	16,4	22%	5,0	7,3	46%
Toledo	6,1	7,3	19%	7,8	9,7	24%	3,3	4,2	27%
Mun. Madrid	7,0	7,3	5%	8,4	9,0	8%	4,8	5,5	14%
Com. Madrid	7,3	8,2	13%	8,7	10,3	18%	4,7	5,7	21%

Fuente: Encuestas domiciliarias de movilidad y elaboración propia.

Figura 4. Distancia media de recorrido en los diferentes corredores, km<sup>7</sup>

El aumento de la circulación de vehículos privados provoca la situación de congestión en la que actualmente se encuentra la Comunidad de Madrid, como se define en la siguiente figura 5.

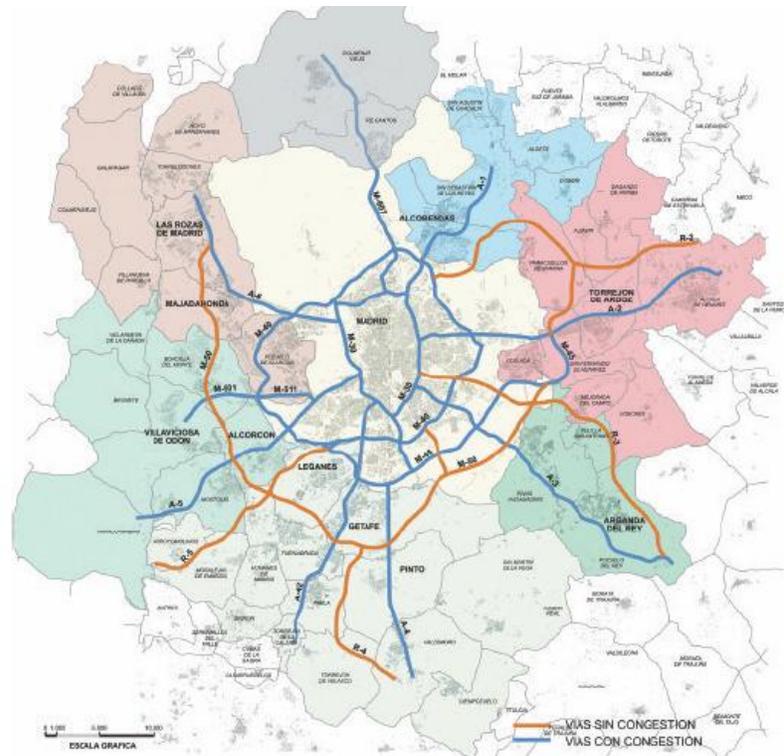


Figura 5. Vías de congestión metropolitana.<sup>8</sup>

Este efecto es particularmente de importancia en los corredores a los que comunica el Parque de Valdebebas, A-1 y A-2, así como el vial de circunvalación M-40 a su paso por el norte de la periferia donde se sitúa Valdebebas, como se muestra en la siguiente figura 6.

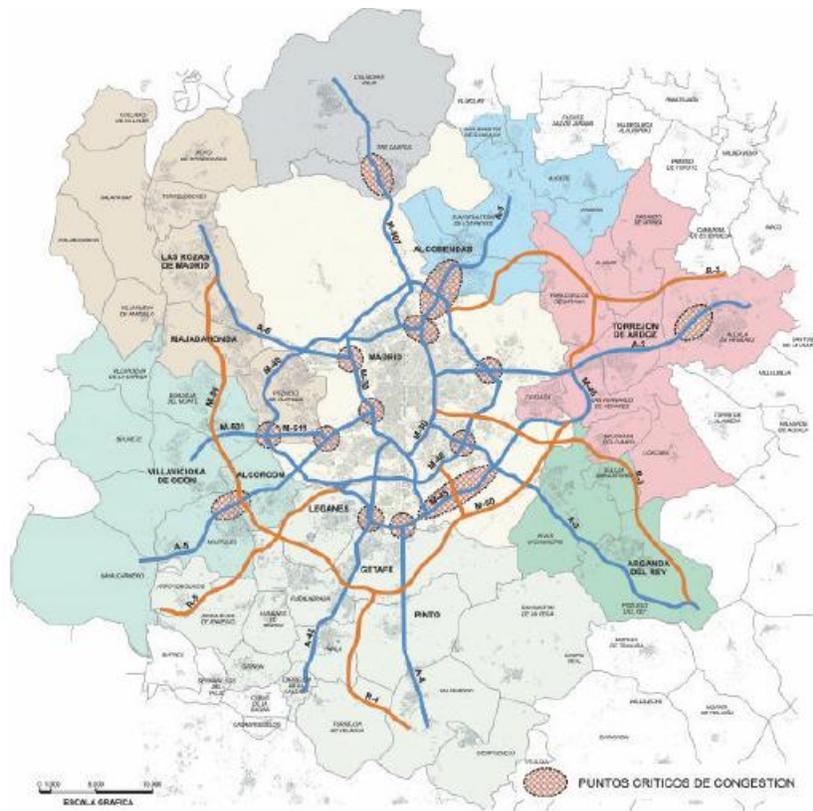


Figura 6. Puntos críticos de congestión<sup>8</sup>

El efecto de congestión se aprecia mejor en las figuras 7, 8, 9 y 10 donde se aprecia la reducción de la velocidad media en las horas punta de entrada y salida en los principales viales.

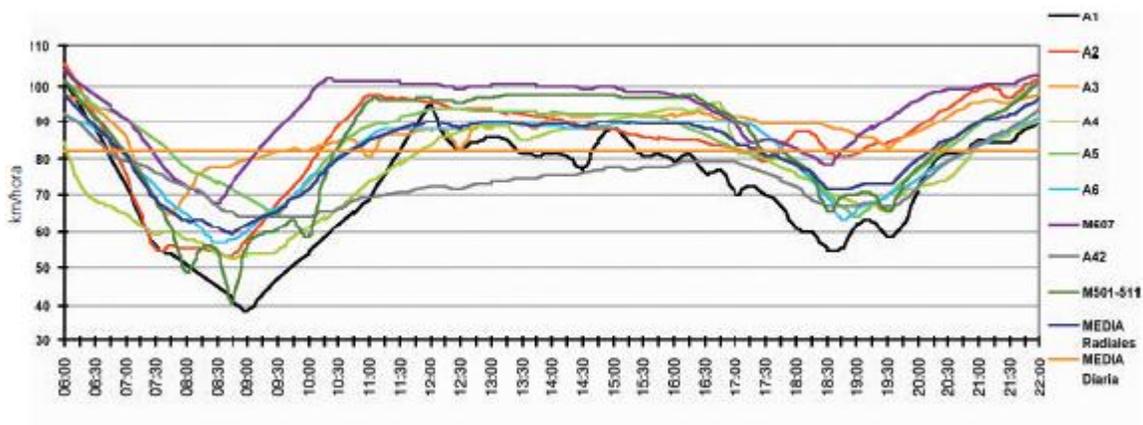


Figura 7. Variaciones de velocidad media por vía radial, sentido entrada<sup>8</sup>

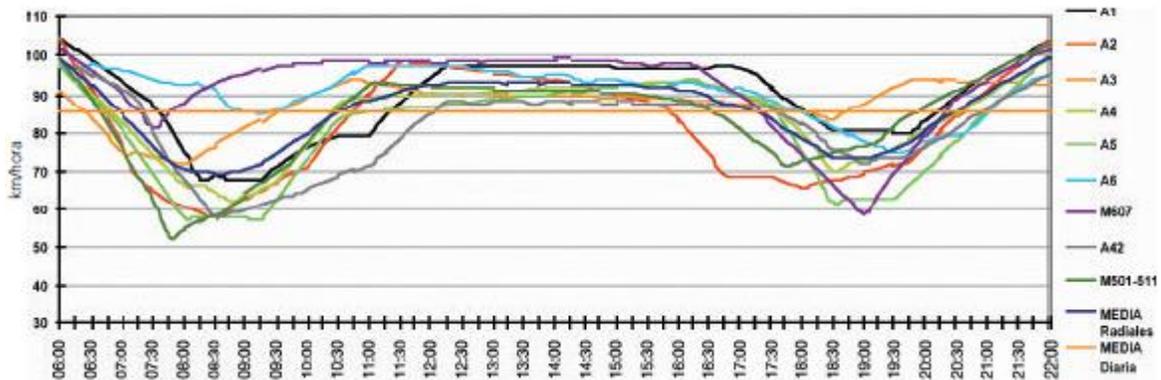


Figura 8. Variaciones de velocidad media por vía radial, sentido salida<sup>8</sup>

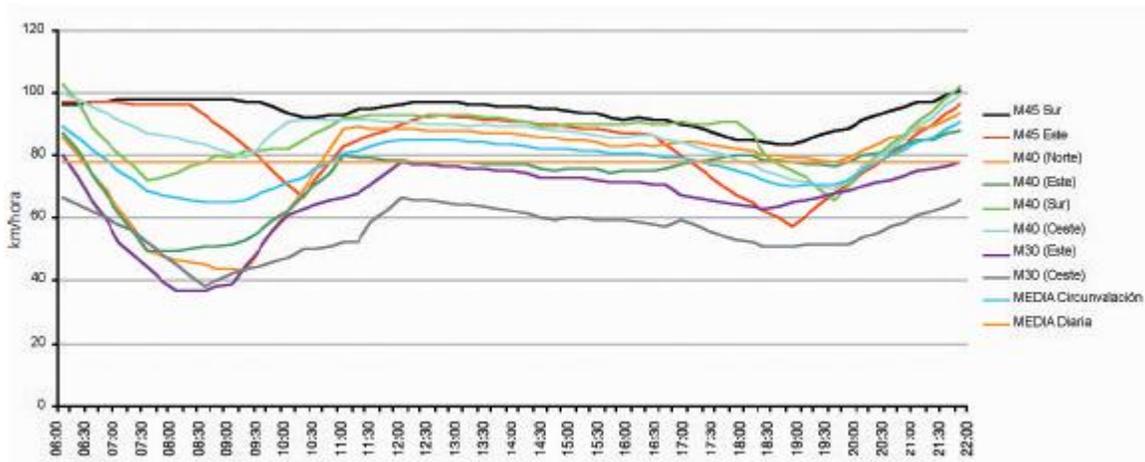


Figura 9. Variaciones de velocidad media por vía de circunvalación, sentido entrada<sup>8</sup>

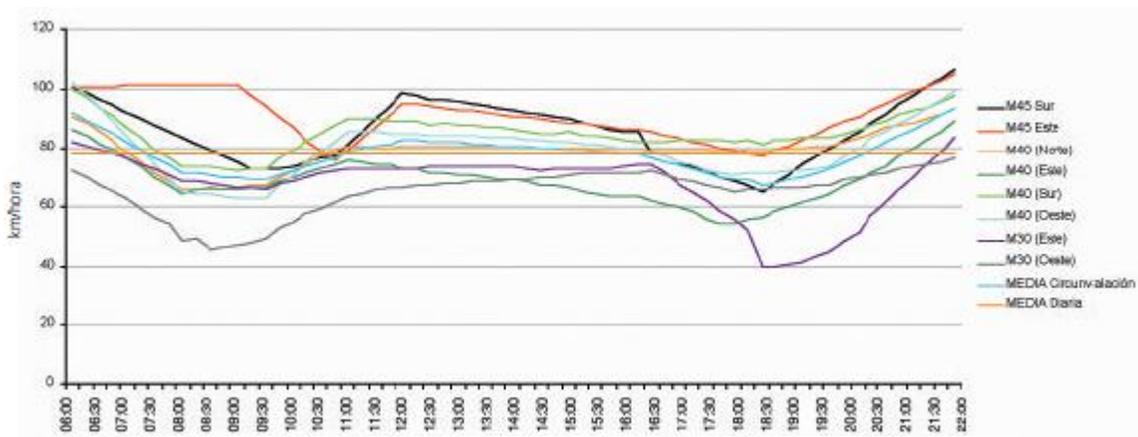


Figura 10. Variaciones de velocidad media por vía de circunvalación, sentido salida<sup>8</sup>

La figura 11 muestra la relevante dependencia del vehículo privado para los desplazamientos entre la periferia y la corona metropolitana con un casi 60% de los viajes realizados en coche.

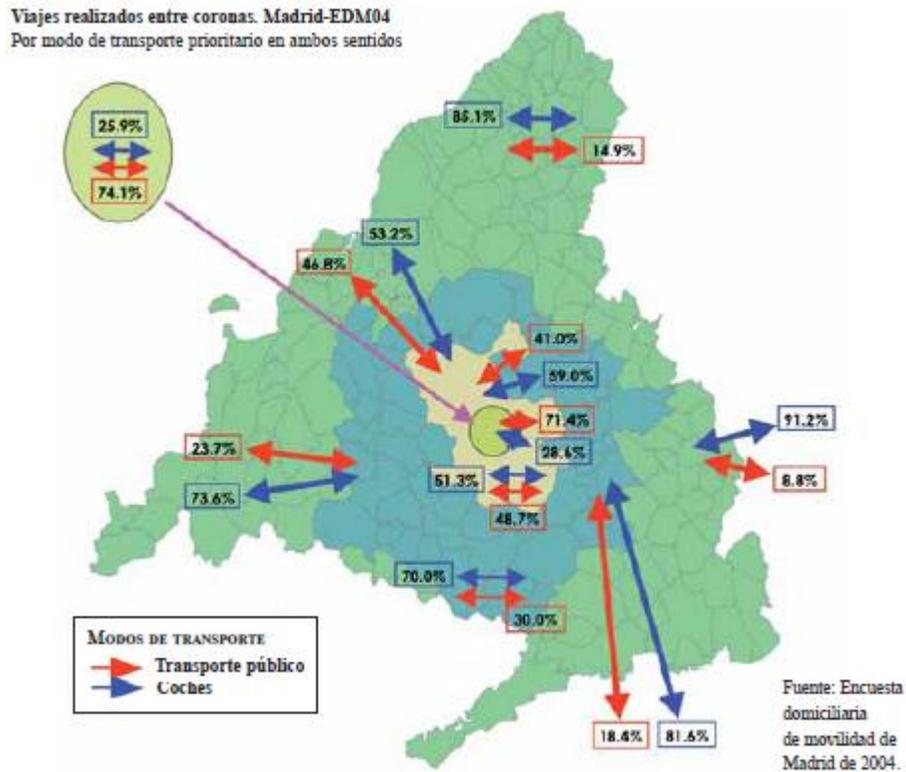


Figura 11. Distribución modal en 2004 en la Comunidad de Madrid<sup>7</sup>

Cualquier esfuerzo en la dirección de reducir la dependencia del vehículo privado debe competir con las razones que persuaden al ciudadano de hacer uso de su propio vehículo en vez del transporte público. Estas son la independencia, la libertad de movimiento y la accesibilidad al transporte público. Los modos tradicionales de transporte han fallado en contentar estas demandas y por lo tanto no representan una solución completa al problema. De hecho, estos factores no son tan críticos hoy en día ya que la congestión, la dificultad de acceso al lugar de trabajo y la reducción del espacio de aparcamiento son motivo de preocupación sobre la necesidad de sistemas alternativos. A esto hay que sumar la contaminación urbana, el uso del suelo, o la dependencia del petróleo derivados de la dependencia del uso del coche, elementos con creciente presencia en la política nacional.

## **4. Trazado de la red, capacidad de pasajeros y consumo energético**

### **4.1. Trazado de la red**

El objetivo del trazado de la red es dar servicio a los distintos tipos de desplazamiento que se producirán en el desarrollo urbanístico del Parque de Valdebebas originados por los usos del suelo: residencial, terciario, comercial, dotacional privado y público.

El factor principal del diseño del trazado se ha concentrado en base a la estación de tren de cercanías que forma parte del plan urbanístico en el centro de Valdebebas. De esta manera, se pretende promover el uso del tren de cercanías como acceso/salida a Valdebebas y el sistema PRT como distribuidor de los desplazamientos internos, disuadiendo a los usuarios del uso del vehículo privado en los desplazamientos tanto internos como externos.

El sector residencial se divide principalmente entre el sector noreste de Valdebebas y el sector suroeste, donde también se ha tenido en cuenta las viviendas existentes que quedan fuera del desarrollo del Parque de Valdebebas y de esta manera mejorar su acceso al transporte público.

El sector terciario se distribuye principalmente desde el sureste hasta el noreste de Valdebebas.

El sector comercial se encuentra, en su mayoría, en el noreste de Valdebebas, y corresponde a un centro comercial.

El sector dotacional privado se ubica al sureste y pertenece en su mayor parte a la Ciudad Deportiva del Real Madrid, única elemento del desarrollo de Valdebebas ya construido en estos momentos.

El sector dotacional público se distribuye entre la ampliación del complejo Feria de Madrid, IFEMA al sur y la Ciudad de la Justicia al este. En el caso del IFEMA se ha propuesto una línea con el actual emplazamiento de la Feria de Madrid, ofreciendo así una conexión de transporte público entre ambos y desde el aeropuerto a través de la estación de tren de cercanías que se proyecta comunique con la Terminal 4.

En la siguiente figura 12 se muestra la propuesta de diseño del trazado de la red.

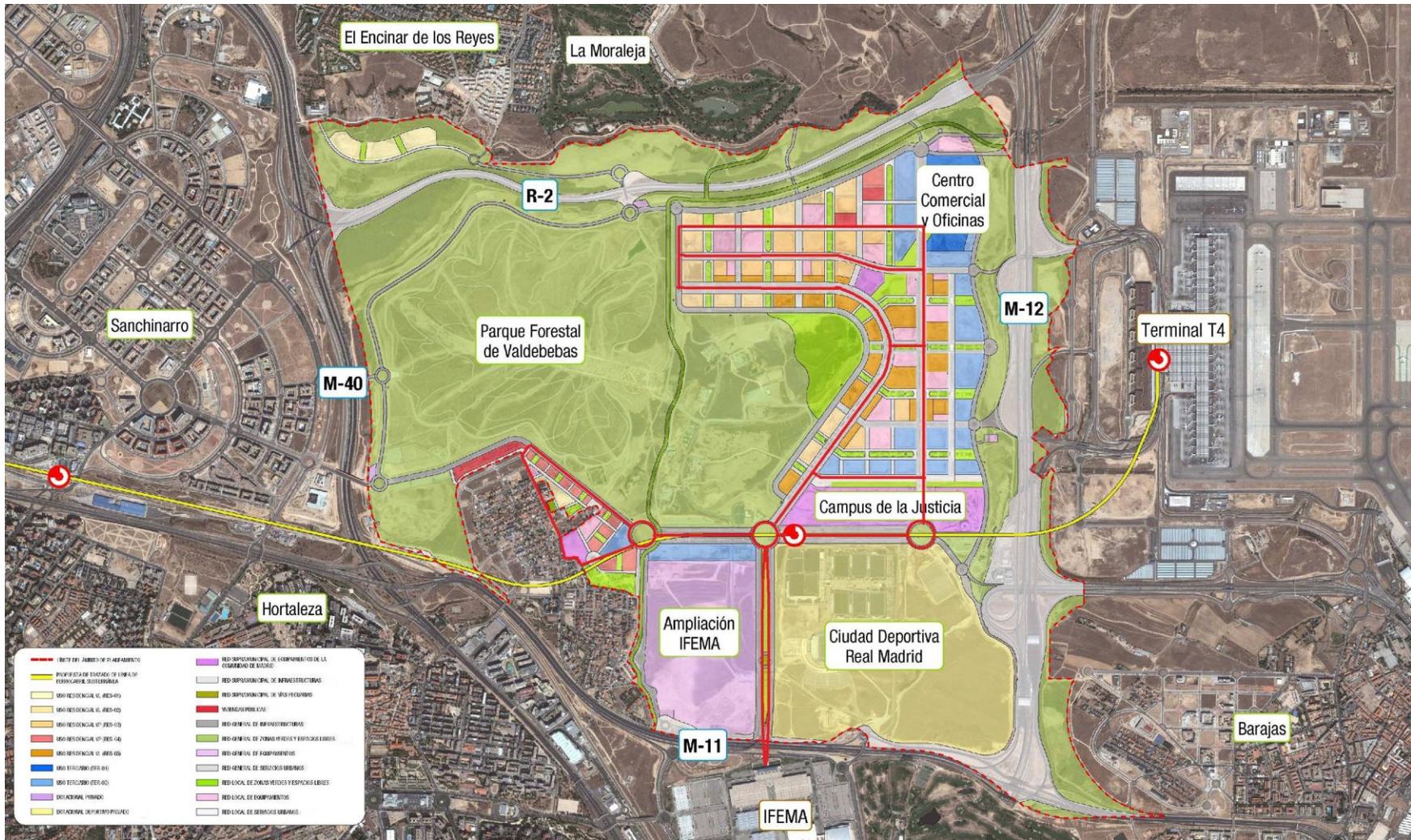


Figura 12. Propuesta de trazado de la res de un sistema PRT en el Parque de Valdebebas. Fuente: elaboración propia

## 4.2. Capacidad de pasajeros

En un proyecto financiado por la Cámara de Comercio de Estocolmo se compararon los costes capitales y operativos en base a pasajero por kilómetro recorrido entre diferentes modos de transporte: el autobús, metro ligero o LRT por sus siglas en inglés, el metro y el tren de cercanías en Estocolmo. En este estudio también se compara la capacidad de transportar viajeros entre los diferentes modos de transporte. Los resultados muestran una mayor capacidad del sistema PRT frente a otros sistemas de transporte y por lo tanto que puede transportar la cantidad de pasajeros que se estima se producirán en el Parque de Valdebebas. La capacidad de pasajeros en servicios mínimos y máximos se muestra en la siguiente figura 13:

Transit mode	Cap./veh.(seated & stand)	Vehicles per train (min)	Vehicles per train (max)	Passenger/train (min)	Passenger/train (max)	Daily pass.cap. at min service (2 directions)	Daily pass.cap. at maxn service (2 directions)
City Bus	119	1	1	119	119	9 520	24 276
Bus Way	119	1	1	119	119	9 520	24 276
LRT	106	2	6	212	636	16 960	129 744
Metro	138	6	9	828	1 242	66 240	253 368
Commuter rail	150	6	8	900	1 200	72 000	244 800
AGT	106	2	6	212	636	16 960	129 744
PRT	4	1	1	4	4	57 600	122 400

Figura 13. Capacidad de vehículos y pasajeros diarios para diferentes modos de transporte de acuerdo a ciertas suposiciones.<sup>9</sup>

La capacidad diaria para los modos de transporte analizados se presenta gráficamente en la figura 14.

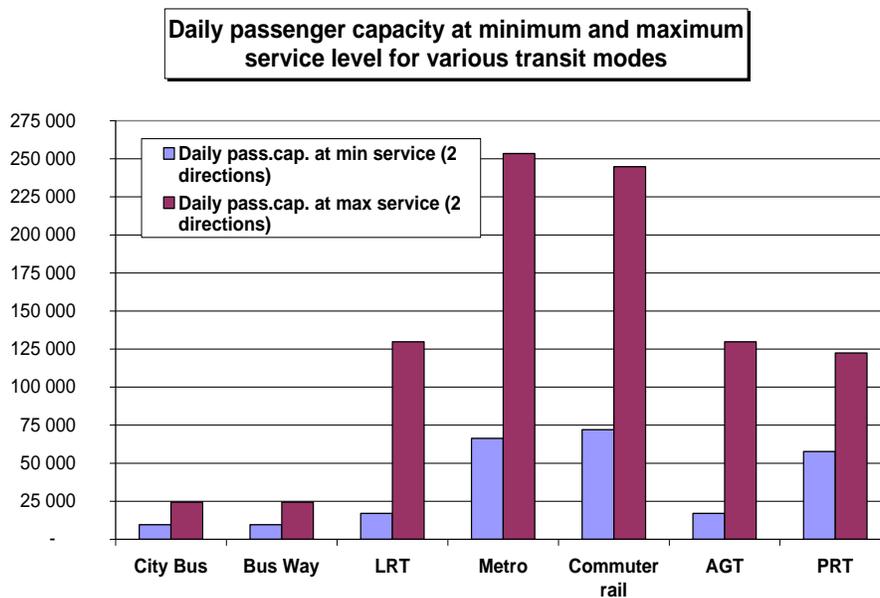


Figura. 14 Capacidad diaria para varios modos de transporte en servicios mínimos y máximos<sup>10</sup>

Los datos sobre capacidad de viajeros por vehículo de los modos de transporte tradicionales se derivan la compañía de transporte Greater Stockholm Transit SL.

El sistema PRT arroja una gran capacidad de viajeros a pesar del uso de vehículos pequeños debido a su extrema alta frecuencia de servicio.

La cantidad de viajes generados y atraídos al día por el Parque de Valdebebas se extrae del *Estudio de tráfico del Plan Parcial Ciudad Aeroportuaria Parque de Valdebebas*, del cual se extraen las cifras de 26.505 viajes generados en vehículo privado al día que se suman a los 73.728 viajes atraídos en vehículo privado al día, lo que arroja la cifra final de 100.233 viajes en ambos sentidos de acceso y salida al día, como se muestra en las figuras 15 y 16.

Zona transporte	Total Generados	Mecanizados	%Mec./ Gen.	Privado	%Priv./ Gen.
1	6.591	5.273	80,0%	2.234	42,4%
2	6.542	5.234	80,0%	2.218	42,4%
3	4.475	3.560	80,0%	1.517	42,4%
4	9.592	7.674	80,0%	3.252	42,4%
5	4.155	3.324	80,0%	1.408	42,4%
6	2.599	2.079	80,0%	881	42,4%
7	5.740	4.592	80,0%	1.946	42,4%
8	1.726	1.381	80,0%	585	42,4%
9	3.748	2.999	80,0%	1.271	42,4%
10	4.474	3.579	80,0%	1.517	42,4%
11	2.083	1.667	80,0%	706	42,4%
12	2.083	1.667	80,0%	706	42,4%
13	4.866	3.893	80,0%	1.650	42,4%
14	0	0	0,0%	0	0,0%
15	2.048	1.639	80,0%	694	42,4%
16	0	0	0,0%	0	0,0%
17	0	0	0,0%	0	0,0%
18	2.544	2.035	80,0%	862	42,4%
19	0	0	0,0%	0	0,0%
20	0	0	0,0%	0	0,0%
21	0	0	0,0%	0	0,0%
22	1.636	1.309	80,0%	555	42,4%
23	1.480	1.184	80,0%	502	42,4%
24	0	0	0,0%	0	0,0%
25	0	0	0,0%	0	0,0%
26	0	0	0,0%	0	0,0%
27	6.786	5.429	80,0%	2.530	46,6%
28	3.946	3.157	80,0%	1.472	46,6%
<b>TOTAL</b>	<b>77.116</b>	<b>61.693</b>	<b>80,0%</b>	<b>26.505</b>	<b>43,0%</b>

Figura 15. Viajes generados por zona de transporte (viaj/día). Modelo de tasas<sup>11</sup>

Zona transporte	Total Atraídos	Mecanizados	%Mec./ Gen.	Privado	%Priv./ Gen.
1	361	312	82,0%	119	36,1%
2	3.484	2.347	67,4%	656	26,0%
3	577	514	89,2%	144	26,0%
4	1.110	909	81,9%	254	26,0%
5	507	450	88,8%	126	26,0%
6	798	739	92,6%	207	26,0%
7	22.177	20.755	93,6%	5.804	26,0%
8	4.570	3.864	84,6%	1.081	26,0%
9	1.750	1.634	93,4%	789	48,3%
10	2.228	1.702	76,4%	484	26,5%
11	1.574	1.387	88,1%	388	26,0%
12	1.188	1.074	90,4%	300	26,0%
13	851	772	90,7%	216	26,0%
14	3.984	3.726	93,5%	1.421	38,1%
15	16.188	14.768	91,2%	4.431	30,0%
16	12.102	11.449	94,6%	7.762	67,8%
17	29.822	28.299	94,9%	14.280	50,5%
18	2.318	2.183	94,2%	1.055	48,3%
19	10.723	10.187	95,0%	4.921	48,3%
20	10.251	9.739	95,0%	4.704	48,3%
21	5.720	5.434	95,0%	2.625	48,3%
22	95	78	82,0%	37	48,3%
23	85	70	82,0%	34	48,3%
24	4.251	4.039	95,0%	1.540	38,1%
25	43.095	25.396	58,9%	12.268	48,3%
26	22.726	19.380	85,3%	3.778	19,5%
27	10.246	8.649	84,4%	2.836	32,8%
28	6.444	3.765	58,4%	1.468	39,0%
<b>TOTAL</b>	<b>219.246</b>	<b>183.622</b>	<b>83,8%</b>	<b>73.728</b>	<b>40,2%</b>

Figura 16. Viajes atraídos por zona de transporte (viaj/día). Modelo de tasas<sup>11</sup>

Como se ha comprobado anteriormente la capacidad de transportar viajeros de un sistema PRT bajo alta demanda es de 122.400 viajes al día lo que permite dar capacidad a todos los viajes previstos, aunque hay que tener en cuenta que en ninguno caso se asume que el sistema PRT sustituya el 100% de los viajes en coche, por lo que su capacidad de transporte no se ve amenazada de colapsar.

### 4.3. Consumo energético

Como se muestra en la figura 17 el consumo energético del sistema PRT es menor que el de los automóviles. Si se asume un consumo de 660 W/h por vehículo PRT a 45 km/h<sup>1</sup> y se compara con un consumo medio de 6.8 kW por automóvil a la misma velocidad<sup>10</sup> se observa que el consumo del coche es mayor y por lo tanto produce mayor cantidad de emisiones.

La fuente energética de un sistema PRT es la electricidad que se produce en centrales energéticas locales donde la emisión de gases es controlada y reducida. Más allá, los bajos requerimientos energéticos de un sistema PRT permiten que el suministro se realice desde fuentes de energía renovables lo que transformaría las emisiones en nulas o insignificantes.

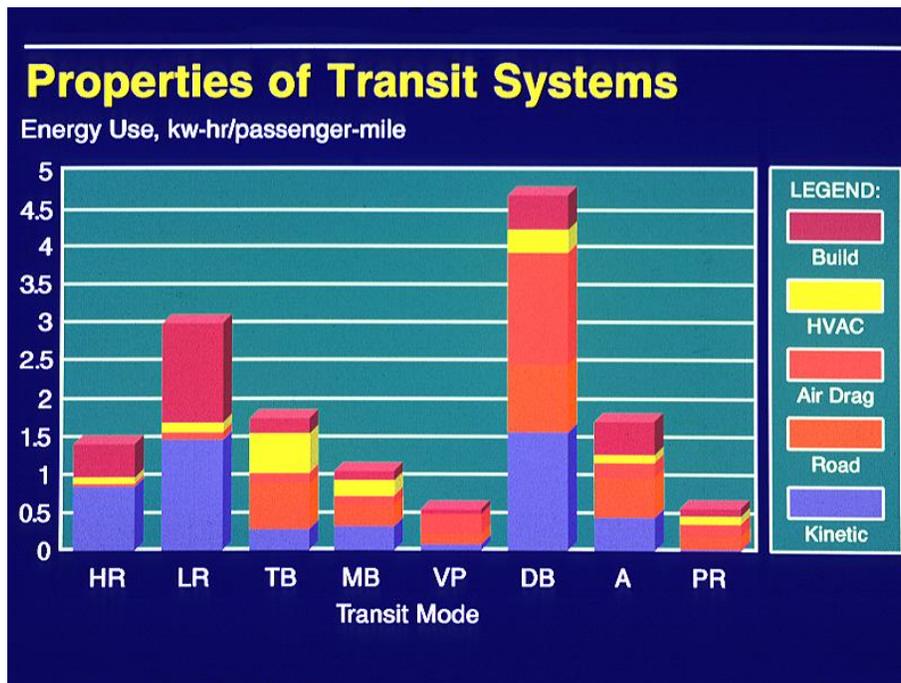


Figura 17. Comparativa del consumo energético de varios modos de transporte<sup>12</sup>  
HR: Tren, LR: Metro Ligero, TB: Autobús, MB: Metrobús, A: Automóvil, PR: PRT

## **5. Impacto Ambiental**

### **5.1. Base Legal**

El diseño, proceso de estudio e implementación final de un sistema PRT podría requerir de una Evaluación de Impacto Medioambiental para cumplir con la legislación estatal y local, ya que cumple los requerimientos expresados en el grupo 10 relativo a proyectos de infraestructuras caso h) “Tranvías, metros aéreos y subterráneos, líneas suspendidas o líneas similares de un determinado tipo, que sirvan exclusiva o parcialmente para el transporte de pasajeros” presente en el anexo II de la Directiva Europea 85/337/EEC modificada posteriormente por la Directiva 97/11/CE y en vigor estatal a través del Real Decreto Legislativo 1/2008, adaptada a la normativa de la Comunidad de Madrid mediante la Ley 2/2002.

Debido al desarrollo inicial del sistema PRT como modo de transporte no existe un marco legislativo específico al respecto. Sin embargo, se considera que un sistema PRT incluye los requerimientos técnicos para ser considerado como modo de transporte sobre raíles ( ver la sección Descripción y conceptos del sistema PRT ) por lo que se estima cumpliría para ser tratado como ferrocarril y por lo tanto le sería de aplicación la Ley 39/2003 del sector ferroviario.

### **5.2. Impacto de la emisiones contaminantes**

La figuras 18 y 19 recogen el flujo de tráfico medio de un día laborable distribuido en 24 horas en los viales principales. Se observan claramente la existencia de 2 picos, de los cuales el primero se produce entre las 7:00h y las 9:00h y corresponde al tráfico generado por los trabajadores que acceden al puesto de trabajo. El segundo pico, más plano y repartido, se produce entre las 18:00h y las 20:00h y corresponde al tráfico generado por los trabajadores que han finalizado la jornada laboral y retornan a su lugar de residencia.

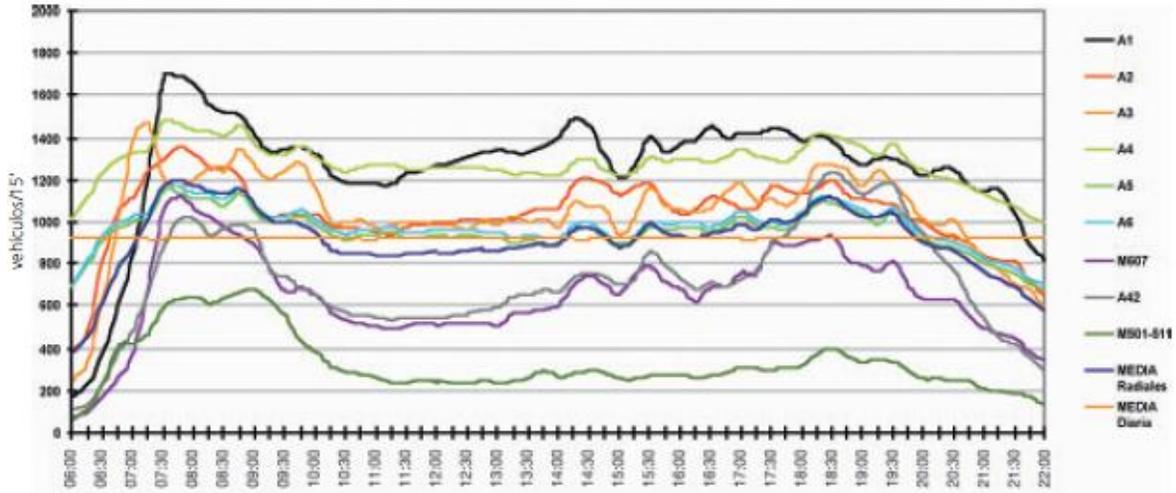


Figura 18. Variaciones de la intensidad media de circulación por vía radial, sentido entrada.<sup>8</sup>

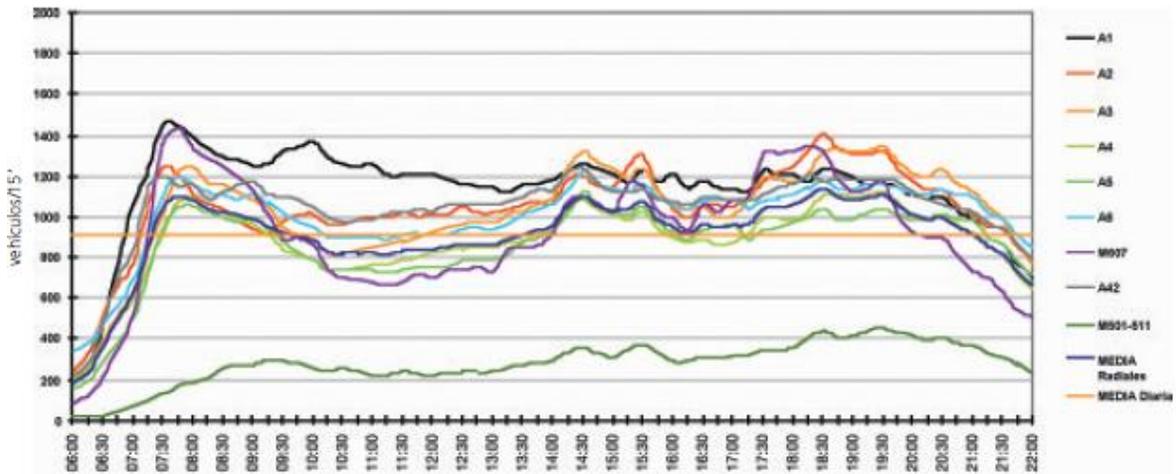


Figura 19. Variaciones de la intensidad media de circulación por vía radial, sentido salida.<sup>8</sup>

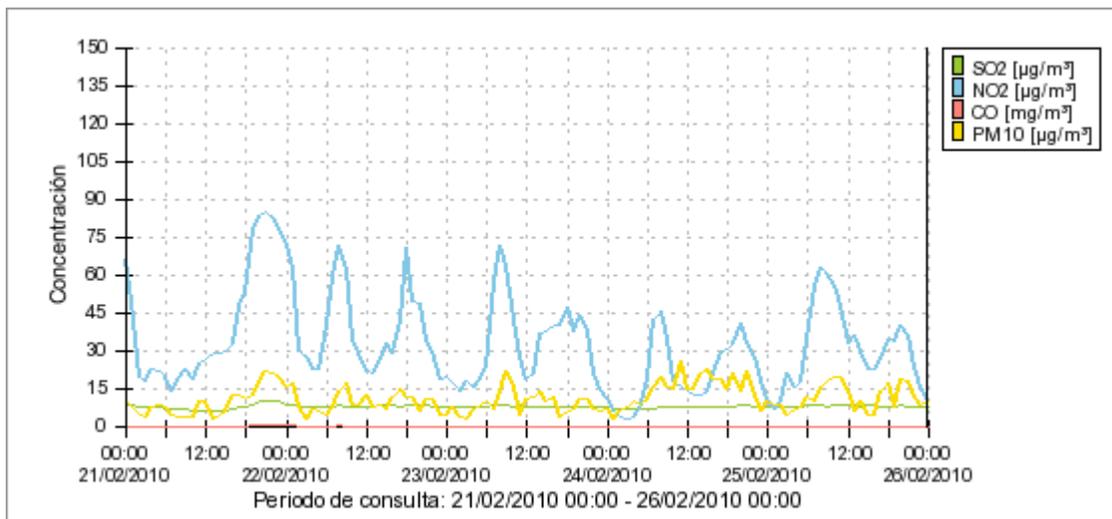


Figura 20. Representación gráfica de datos horarios de la estación de Sanchinarro.<sup>13</sup>

Una comparativa entre los picos del flujo del tráfico de la mañana y de la tarde y los picos en la contaminación atmosférica recogidos en la figura 20 muestran una relación directa entre el tráfico y la calidad del aire urbano (se toma como ejemplo la estación de medición de contaminación ubicada en Sanchinarro por su similitud geográfica y urbanística con el futuro Parque de Valdebebas).

La mayor concentración de contaminantes en áreas urbanas es causada por el incremento del tráfico y el consecuente aumento en la emisión de los gases del tubo de escape.

Otra cuestión añadida es que los picos en el tráfico pueden derivar en congestión de los viales, siendo difícil predecir el efecto en la emisión de que esto produce.

Se estima de forma general que el impacto en la emisión de gases contaminantes durante la congestión puede incrementar entre un 20% y un 30% y que la combinación del periodo de picos en el flujo del tráfico por la mañana y por la tarde representa un 55% de la emisión de gases derivado del tráfico de un día laboral.<sup>14</sup> La única manera de reducir estos picos de contaminación es reduciendo a su vez la presencia de vehículos en las carreteras.

## **5.2.1. Modelo de emisiones**

### **5.2.1.1. Introducción**

El objetivo del PRT es disminuir el número de vehículos de uso privado en los viajes en carretera.

Esta sustitución producirá una reducción de los conocidos impactos negativos de los vehículos tales como gases contaminantes locales y emisiones de gases precursores del efecto invernadero. En este proceso, el modelo de emisiones ha sido construido a fin de cuantificar una suma aproximada de las gases de escape de los vehículos estimados originarán el desarrollo urbanístico del Parque de Valdebebas.

Finalmente, la propuesta consiste en estimar la proporción de contaminantes que disminuirán debido a la reducción de la presencia de los vehículos en las carreteras por sustitución de los mismos por el uso intermodal del PRT con otros transporte públicos.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que cualquier intento de estimación exacta requiere de un extenso trabajo de campo llevado a cabo por expertos como parte de un equipo multi-disciplinar y por lo tanto esta aproximación es meramente una versión de la situación real.

El modelo ha sido construido usando el programa Microsoft Excel y consiste en una hoja de cálculo que incluye un número de variables capaces de influenciar de manera específica la cantidad de gases o emisiones que un vehículo produce. Entre estas variables se debe remarcar la consideración de las emisiones debidas al efecto de arranque del motor en frío.

La planificación urbana actual hace uso de modelos de factor de emisión para calcular las emisiones de los vehículos basándose en su comportamiento a temperaturas operativas estándar, sin embargo la mayoría de los viajes son de corta duración y tienen lugar en áreas urbanas. Estos viajes comienzan (y la mayoría finalizan) con el vehículo por debajo de las temperaturas operativas estándar, bajo estas condiciones la emisión de la mayoría de los contaminantes será más alta que las calculadas con los modelos de factores de emisión.

Este “exceso de emisiones por arranque en frío” es de considerable relevancia para la planificación medioambiental.<sup>15</sup>

Consecuentemente, reducir el uso del vehículo en distancias cortas tendrá un efecto mayor sobre la calidad del aire que reduciendo el uso del vehículo en distancias largas, que con el motor caliente generan menos emisiones y tienen un menor impacto las áreas urbanas.

Las razones para este efecto se explican en la siguiente descripción del modelo de emisiones y como cada variable considerada influencia el resultado final.

#### **5.2.1.2. Contaminantes**

##### **Óxidos de nitrógeno (NO, NO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O)**

El nivel en áreas urbanas se encuentran generalmente entre 10.45 ppb. Los niveles varían significativamente a lo largo del día con 2 puntas diarias como consecuencia de las horas punta de tráfico. Los mecanismos de formación de compuestos NO<sub>x</sub> son principalmente fuentes de combustión a través de la oxidación a altas temperaturas del nitrógeno: mecanismo Thermal-NO, mecanismo Prompt-NO y mecanismo Fuel-NO.

*Salud y Medioambiente:* El monóxido de nitrógeno es casi inocuo para la salud humana, pero cuando se enfría reacciona con el ozono formando dióxido de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno es un gas tóxico y reacciona en la atmósfera formando ácido nítrico que contribuye a la formación del efecto lluvia ácida. También participa de la formación de partículas en suspensión y smog fotoquímico. El N<sub>2</sub>O tiene relevancia hoy en día debido a que contribuye, a pesar de concentraciones más bajas que NO o NO<sub>2</sub>, al proceso de cambio climático,

##### **Monóxido de carbono (CO)**

El nivel en áreas urbanas es altamente variable, dependiendo de las condiciones climáticas y la densidad del tráfico. Los valores medios en 8 horas se encuentran generalmente por debajo de 10 ppm (12 mg m<sup>-3</sup>), pero pueden darse niveles de hasta 50 ppm (60 mg m<sup>-3</sup>). La mayor fuente de CO es el motor de encendido por chispa. En la atmósfera reacciona formando dióxido de carbono.

*Salud y Medioambiente:* El monóxido de carbono es un gas tóxico que desplaza al oxígeno en sangre y está relacionado con efectos negativos neurológicos y cardiovasculares.

### **Hidrocarburos (HCs)**

Los hidrocarburos están formados por una larga lista de compuestos que se basan en el carbón. De especial interés son los COVs (Componentes Orgánicos Volátiles) como el benceno, el 1,3-butadieno, o los HAPs (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos).

*Salud y Medioambiente:* Los COVs participan en la formación de smog fotoquímico la formación secundaria de partículas en suspensión en la atmósfera. Los COVs tienen una alta absorción de radiación por lo que contribuyen al efecto invernadero. El Benceno es un reconocido agente genotóxico y carcinógeno para el ser humano al igual que el 1,3-butadieno y los HAPs.

### **Partículas en suspensión (PM)**

El nivel en áreas urbanas se encuentra generalmente entre 50-150  $\mu\text{g m}^{-3}$  por el método gravimétrico. Los valores punta pueden alcanzar niveles de 200-400  $\mu\text{g m}^{-3}$  por el método gravimétrico. Las partículas en suspensión se dividen entre primarias y secundarias.

Las partículas secundarias se forman en la atmósfera debido a contaminantes gaseosas y las primarias se emiten directamente.

*Salud y Medioambiente:* Dependiendo de su tamaño pueden aumentar la mortalidad o afectar las vías respiratorias. Las partículas en suspensión son contribuidoras potenciales del calentamiento global y del efecto lluvia ácida.

### **Ozono (O<sub>3</sub>)**

El nivel base varía entre 15 a 60 ppb. Los valores máximos pueden exceder 175 ppb en áreas urbanas.

El ozono es difícil de controlar porque no se emite a la atmósfera sino que se forma en la troposfera a través de un proceso fotoquímico que involucra la acción de los contaminantes COVs y NOx.

*Salud y Medioambiente:* Los efectos en la salud humana incluyen irritaciones y disfunciones respiratorias. El ozono puede dañar los materiales acelerando procesos de oxidación e igualmente tiene un efecto negativo en la vegetación.

## **Dióxido de carbono y metano (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>)**

Tanto el dióxido de carbono como el metano contribuyen con una estimación del 65% y del 20% respectivamente al incremento del efecto del calentamiento global. El dióxido de carbono producido por la combustión en los vehículos de uso privado se estima que contribuye con la mitad del originado por el transporte.

### **5.2.1.3. Emisiones del arranque en frío o Cold Start Emissions**

Las emisiones debidas al arranque en frío en un motor de explosión o gasolina, son mayores que en motor de compresión o diesel.

Esto se debe a que el aceite lubricante, el agua y las partes metálicas del motor a temperaturas ambientes frías provocan una menor la vaporización del combustible en la admisión, para contrarrestar este efecto el motor debe añadir más combustible a la mezcla. Debido a la baja temperatura, aumenta el volumen de las grietas entre pistón y las paredes de este, lo cual incrementa el escape de emisiones.

El aceite lubricante a temperaturas bajas absorbe más hidrocarburos, así como su viscosidad es mayor lo que aumenta las pérdidas por fricción que incrementan a su vez el consumo de combustible, cuanto más combustible se añade a la mezcla más emisiones se generan.

El exceso de emisiones del arranque en frío se muestra en la figura 21 donde se muestra un ciclo de prueba FTP realizado en EEUU para medir las emisiones de los vehículos. Como se puede observar, el mayor porcentaje de emisiones se producen en los primeros 120 segundos desde el arranque del motor.

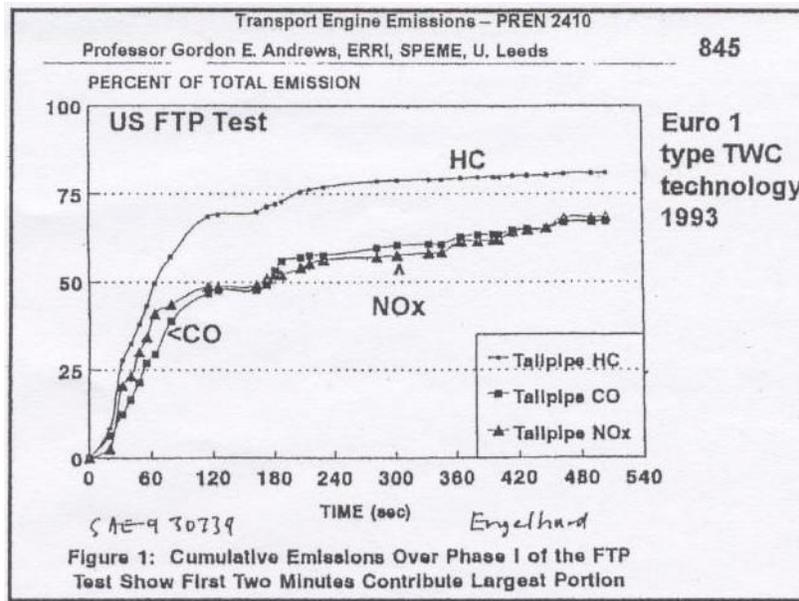


Figura 21. Emisiones acumulativas en la Fase I del Test FTP<sup>16</sup>

Además, el cumplimiento de los motores de gasolina con los límites de emisiones establecidos se logra principalmente gracias a un tratamiento catalítico posterior a la combustión.

Los catalizadores de triple vía, o TWC por sus siglas en inglés, necesitan actuar con una eficiencia mayor del 90% para conseguir cumplir con la regulación de emisiones, la temperatura a la cual alcanzan este nivel es de 400°C. En el arranque en frío, la baja temperatura de los gases de escape provoca un lento calentamiento de los catalizadores TWC, consecuentemente no alcanzan su temperatura de trabajo óptima y su eficiencia es reducida, por lo que aumenta la concentración de las emisiones de los compuestos regulados.

Los motores de gasolina operan en condiciones estequiométricas para que los catalizadores TWC pueden reducir al mismo tiempo los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno y el monóxido de carbono.

Para poder cumplir con las normas europeas EURO 1,2 y 3 todas las reducciones en las emisiones se consiguieron mediante estrategias para acelerar el proceso de calentamiento de los catalizadores TWC, como se puede observar en la figura 22.

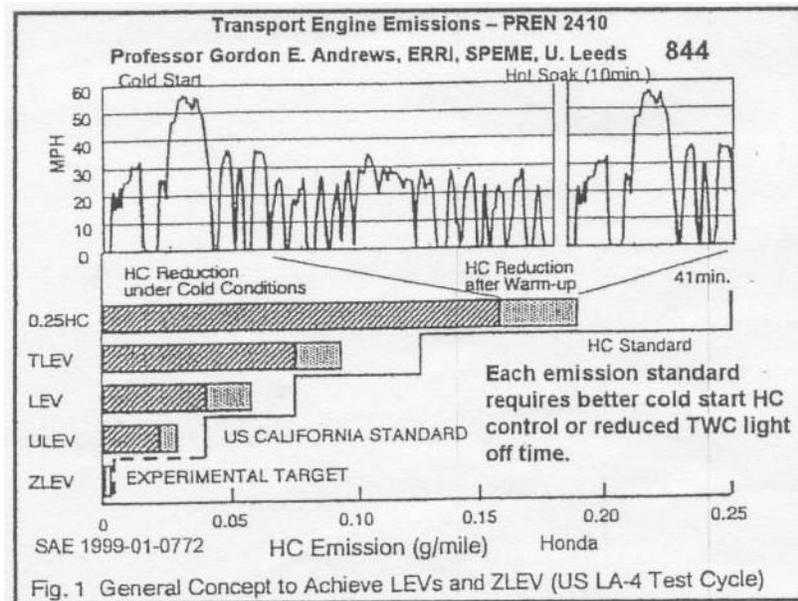


Figura 22. Concepto general para conseguir LEVs and ZLEV (US LA-4 Test Cycle)<sup>16</sup>

Por otro lado los motores diesel funcionan con mezcla pobre, es decir que la proporción de aire/combustible en peso es mayor que la estequiométrica, por lo que tienen una eficiencia térmica mayor y por lo tanto una mejor economía de combustible, produciendo menos hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono. Los motores diesel no usan catalizadores TWC pero generan menos emisiones debido a la inyección del combustible en aire comprimido caliente sin entrar en contacto con superficies frías, lo cual reduce la producción de hidrocarburos y monóxido de carbono.

Consecuentemente, el efecto de arranque en frío para los motores diesel es mínimo, por lo que no se tuvieron en cuenta para el desarrollo del modelo de emisiones.

### 5.2.2. Metodología

El principal objetivo del modelo de emisiones es estimar y evaluar el impacto de las emisiones debido al arranque en frío frente a las emisiones del arranque del motor en caliente haciendo uso de parámetros básicos que influyen en la producción de emisiones.

Modelos complejos como el EXEMPT (Excess EMISSIONS Planning Tool) desarrollado por AEA Technology para la *Charging and Local Transport Division* perteneciente al *Department of the Environment Transport and the Regions* (DETR) del gobierno británico, como proyecto dentro del Programa TRAMAQ, identifica parámetros clave que influyen en

la cantidad absoluta de emisiones en exceso en el arranque en frío. Estos parámetros incluyen el establecimiento de la base matemática de un modelo de emisiones para el arranque en frío, calentamiento del motor, perfil de enfriamiento y los siguientes:

- Tipo de vehículo (incluyendo tamaño del motor, combustible y tipo de tratamiento posterior de gases de escape).
- Temperatura del motor y si es apropiado del catalizador.
- El intervalo de tiempo durante la parada del motor así como la temperatura ambiente.
- El patrón de conducción seguido del arranque del motor.

Los modelos complejos como el EXEMPT podrían ser de uso para realizar estudios más amplios y exactos sobre la cantidad de emisiones por arranque en frío.

A continuación se describen los parámetros identificados para construir el modelo básico y las suposiciones realizadas, estas son:

- Composición de flota por tipo de propulsión.
- Composición de flota por arranque en frío y en caliente.
- Composición de flota por Directivas Europeas sobre emisiones de vehículos.
- Factores de emisión de CO, NO<sub>x</sub>, HC+No<sub>x</sub> y PM.
- Factores de emisión del arranque en frío.
- Factores de emisión de CO<sub>2</sub>.
- Factores de emisión de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O.
- Escenarios de reducción de vehículos y emisiones.

▪ **Composición de flota por tipo de propulsión.**

La distribución en porcentaje de la composición de la flota se estima extrapolando los datos del Parque Nacional de Vehículos en el año 2007.

	<b>Gasolina</b>	<b>Diesel</b>	<b>TOTAL (%)</b>
Turismos	11.500.323		44
Turismos		10.255.430	39
Autobús	---	59.764	
Camiones y Furgonetas	---	4.463.923	
<b>Subtotal Diesel pesados</b>	---	4.523.687	17
<b>TOTAL</b>	26.279.440		100

Tabla 2. Composición de flota por tipo de motor (Fuente: elaboración propia)

En relación a la tabla 2 hay que tener en cuenta los siguientes comentarios:

- Los autobuses y camiones y furgonetas con motores de gasolina representan una mínima proporción y se ha considerado como insignificante su contribución a las emisiones totales. Por lo tanto se les ha excluido del cálculo.
- El resto de las categorías de vehículos tales como motores de gas, eléctricos o motocicletas no aportan una gran contribución al las emisiones totales por lo que no son de interés para el modelo de emisiones.
- Los camiones y furgonetas se asumen como Diesel pesados junto con los autobuses.

▪ **Composición de flota por arranque en frío y arranque en caliente.**

Las emisiones producidas por el arranque en frío del motor tienen un impacto mayor en áreas urbanas, como se ha mostrado anteriormente. Se asume que la mayoría de viajes en las horas punta es por motivos laborales y por lo tanto considerando la distancia recorrida por estos se podría extrapolar el dato a la distribución de arranque en frío y arranque en caliente en el Parque de Valdebebas. En el tramo de 0 a 5 km se asume que el calentamiento del motor no consigue la temperatura requerida para el funcionamiento eficiente del catalizador, por lo que los vehículos en este intervalo se consideran de arranque en frío. Por otro lado se asume que los motores que han recorrido más de 5 km aumentan su temperatura y el catalizador funciona correctamente, en este intervalo se consideran vehículos de arranque en caliente.

De la siguientes figuras 23 y 24, se puede extrapolar que un 40% de los viajes realizados en el Municipio de Madrid es igual o menor de 5 km y un 60% de los viajes son mayores de 5

km. La proporción se mantiene prácticamente invariable entre el acceso y la salida. Se estima para la modelización de emisiones una distancia media de desplazamiento de 10 km.

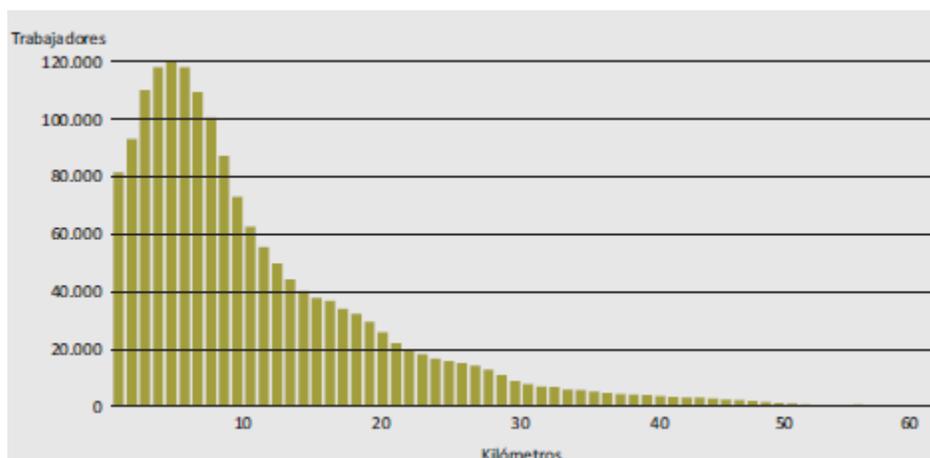


Figura 23. Trabajadores con puesto en Madrid según distancia desde su residencia<sup>17</sup>

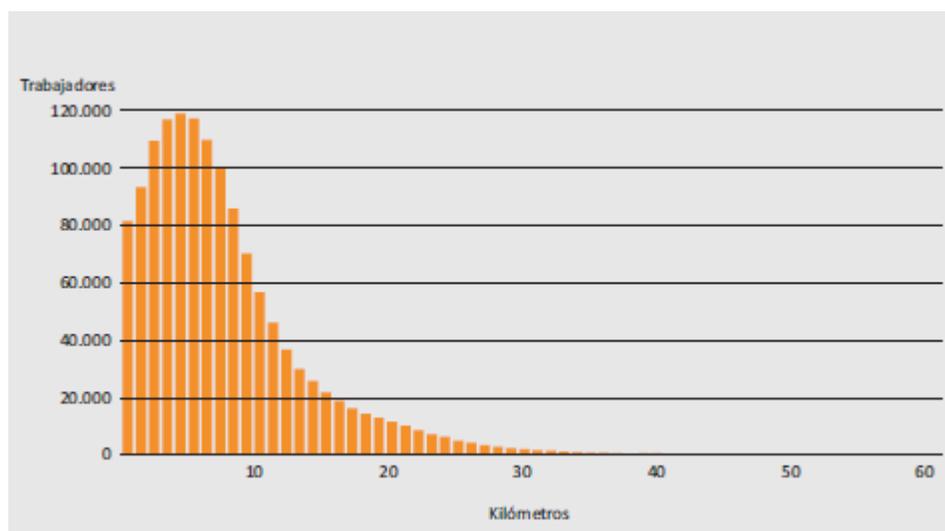


Figura 24. Trabajadores residentes en Madrid hasta su puesto de trabajo<sup>17</sup>

- **Composición de flota por Directivas Europeas sobre emisiones de vehículos.**

La distribución en porcentaje de la composición de la flota se estima extrapolando los datos del Parque Nacional de Vehículos 2007 sobre matriculaciones actuales de vehículos considerando el primer año de matriculación y que los mismos porcentajes se encuentran en la Comunidad de Madrid. En la tabla 3 se puede ver un resumen de la composición de la flota y los valores extraídos para usar en el modelo de emisiones. No se han tenido en cuenta aquellos anteriores al año 1992 debido a la complejidad de estimación de emisiones para estos vehículos. Como la única fuente información sobre parque de vehículos que se ha

podido encontrar corresponde al año 2007, únicamente se considera hasta ese año para la norma EURO IV, a pesar de su vigor hasta el año corriente 2011, en la que comienza la aplicación de la norma EURO V.

Directiva Europea	Período correspondiente	Nº de vehículos	% (con pre 92)	% (sin pre 92)
---	Pre 1992	3.918.473	18	---
Euro I	1992-1996	2.946.650	13,5	16
Euro II	1997-2000	4.646.497	21	26
Euro III	2001-2005	7.075.493	32,5	40
Euro IV	2006 – 2007*	3.173.061	15	18
<b>TOTAL</b>		<b>21.760.174</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Tabla 3. Composición de flota por Regulación Europea. (Fuente: elaboración propia)

▪ **Factores de emisión de CO, NOx, HC+Nox y PM.**

Los Factores de emisión utilizados en el modelo de emisiones para CO, NOx, HC+Nox y PM son los valores Límite de Emisión regulados en la Directiva Europea para vehículos. Estos Valores Límite de Emisión se muestran en la tabla 4 para motor de gasolina y en la tabla 5 para motor diesel.

**Motor Gasolina:** Test Cycle: ECE15 + EUDC. Unidades: gkm-1

Directiva	Fecha de implementación	CO	NOx*	HC*	NOx + HC*	PM*
91/441/EEC	Euro I	2.72			0.97	
94/12/EC	Euro II	2.2			0.50	
98/69/EC	Euro III	2.3	0.15	0.20		
98/69/EC	Euro IV	1	0.08	0.10		

\* Donde no se muestra ningún dato no se establece límite para el contaminante  
Fecha de implementación en referencia a nuevas matriculaciones

Tabla 4. Valores Límite de Emisión para turismos gasolina en Europa

**Motor Diesel:** Test Cycle: ECE15 + EUDC. Unidades: gkm-1

Directiva	Fecha de implementación	CO	NOx*	HC*	NOx + HC	PM
91/441/EEC	Euro I	2.72			0.97	0.14
94/12/EC	Euro II	1			0.7	0.08
98/69/EC	Euro III	0.64	0.5	0.20	0.56	0.05
98/69/EC	Euro IV	0.5	0.25	0.10	0.3	0.025

\* Donde no se muestra ningún dato no se establece límite para el contaminante  
Fecha de implementación en referencia a nuevas matriculaciones

Tabla 5. Valores Límite de Emisión para turismos diesel en Europa

En relación a la información en la tabla 5 no se dispone de información sobre composición de flota en base inyección indirecta (IDI por sus siglas en inglés) o directa en motores diesel. Se asume que todos los vehículos son de inyección indirecta ya que la regulación es más estricta.

Con el objetivo de cuantificar por separado NOx y HC cuando estos se encuentran regulados unidos, asumimos la extrapolación del ratio entre NOx y HC para motores gasolina en EURO III: 1:33 al resto de los valores. Los Factores de Emisión utilizados en modelo se muestran en la tabla 6 para motor gasolina y en la tabla 7 para motor diesel.

<b>Motor gasolina</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>Nox</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>
Euro I	2.72	0.53	0.44	0.97	
Euro II	2.2	0.28	0.22	0.5	
Euro III	2.3	0.2	0.15	0.35	

Tabla 6. Factores de Emisión del motor gasolina utilizados en modelo de emisiones

Fuente: elaboración propia

<b>Motor diesel</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>Nox</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>
Euro I	2.72	0.53	0.44	0.97	0.14
Euro II	1	0.38	0.32	0.7	0.08
Euro III	0.64	0.06	0.5	0.56	0.05

Tabla 7. Factores de Emisión del motor diesel utilizados en modelo de emisiones

Fuente: elaboración propia

#### ▪ **Factor de Emisiones del arranque en frío**

El efecto de las emisiones del arranque en frío varía en tiempo entre cada Directiva Europea.

En EURO I, el 70% de la emisiones por arranque en frío se producen en los primeros 180 segundos y teniendo en cuenta la velocidad del ciclo de prueba ECE15 + EUDC como 35 km/h o 9 m/s arroja que el 70% de las emisiones por arranque en frío se producen en el primer kilómetro y medio del recorrido.

En EURO II, el 70% de la emisiones por arranque en frío se producen en los primeros 120 segundos y teniendo en cuenta la velocidad del ciclo de prueba ECE15 + EUDC como 35 km/h o 9 m/s arroja que el 70% de las emisiones por arranque en frío se producen en el primer kilómetro del recorrido.

En EURO III, el 70% de la emisiones por arranque en frío se producen en los primeros 60 segundos y teniendo en cuenta la velocidad del ciclo de prueba ECE15 + EUDC como 35 km/h o 9 m/s arroja que el 70% de las emisiones por arranque en frío se producen en el primer medio kilómetro del recorrido.

Las figuras 25 y 26 muestran la tendencia descrita.

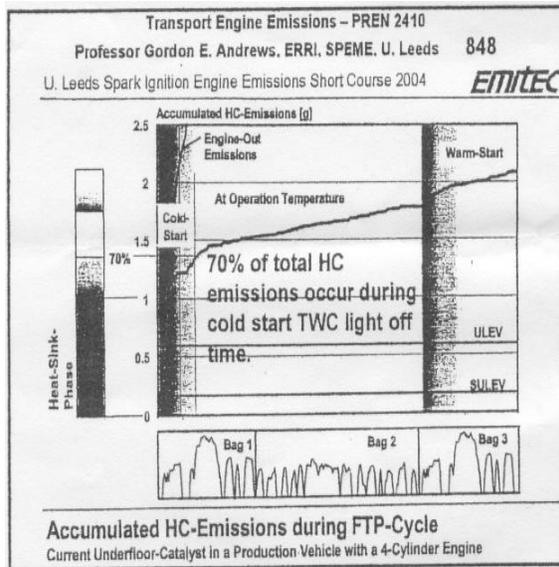


Figura 25. Emisiones acumuladas durante ciclo FTP<sup>16</sup>

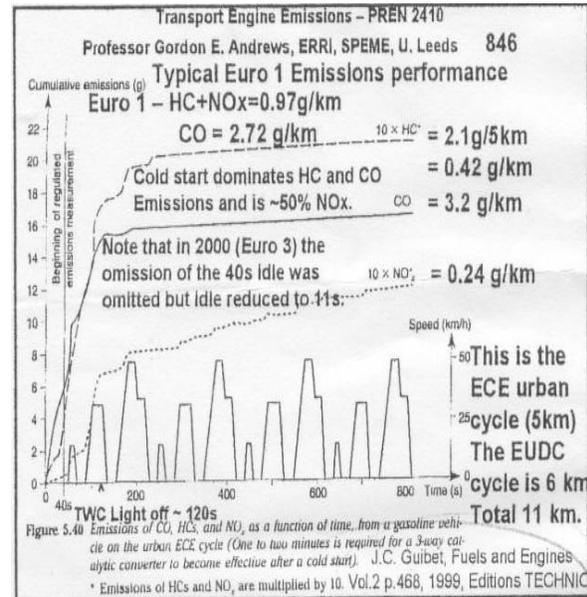


Figura 26. Emisiones en función de tiempo de un motor de gasolina en el ciclo ECE<sup>16</sup>

#### ▪ Factor de emisiones de CO<sub>2</sub>

Las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen del consumo de combustible, que a su vez depende de la eficiencia térmica: mayor eficiencia térmica significa menor consumo energético. La eficiencia térmica depende al mismo tiempo de la temperatura del aceite lubricante, a menor temperatura del aceite menor eficiencia térmica. Por lo tanto con una temperatura baja del aceite lubricante en el arranque en frío provoca un mayor consumo de combustible que genera más emisiones. Esta relación se muestra en la figura 27.

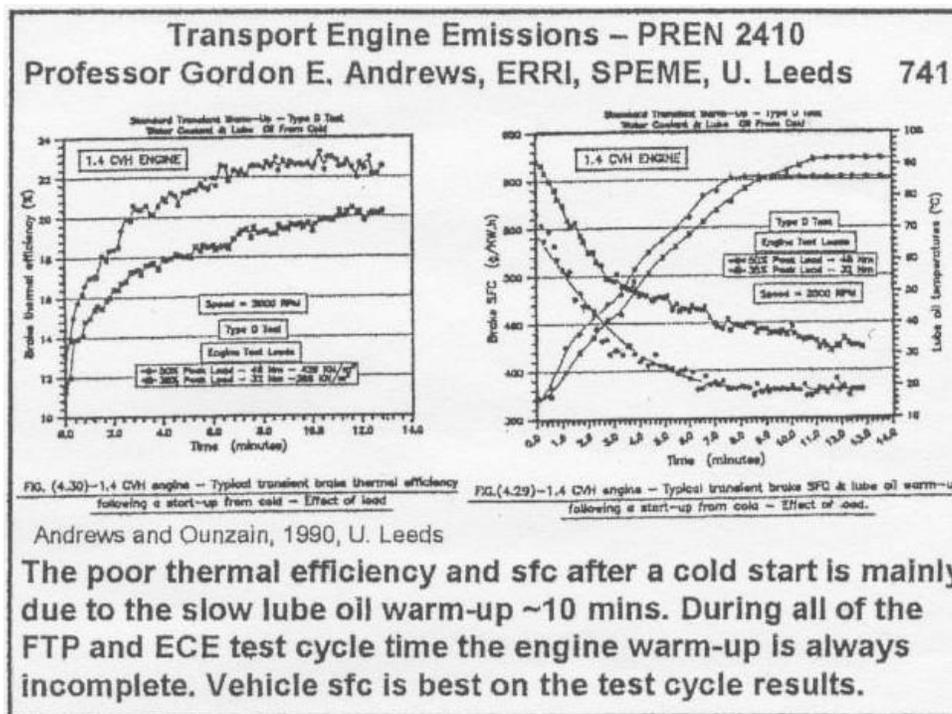


Figura 27. Relación entre eficiencia térmica y la temperatura del aceite lubricante.<sup>16</sup>

Los factores de emisión CO<sub>2</sub> utilizados en el modelo son los siguientes:

**Factores de Emisión  
CO<sub>2</sub>**

<b>Motor Gasolina</b>	180 g/km
<b>Motor Diesel</b>	130 g/km

Estos valores se extraen de la siguiente figura 28.

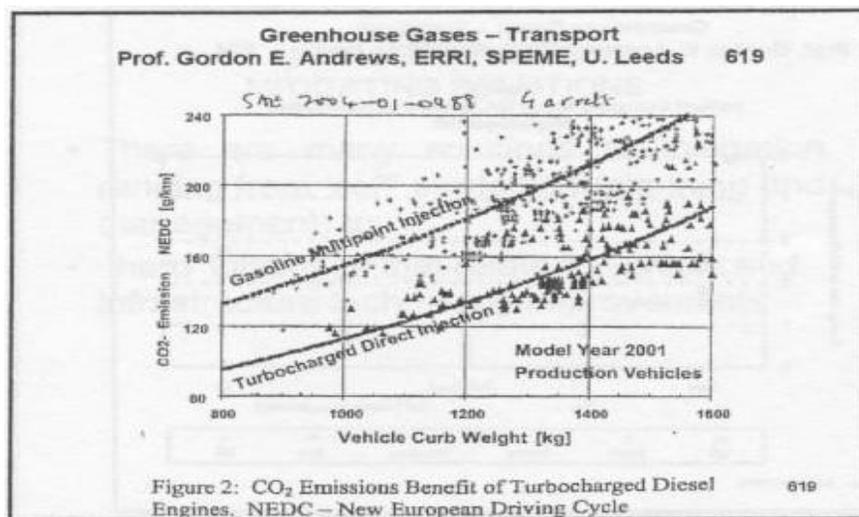


Figura 28. Emisiones CO<sub>2</sub> de motor turbodiésel. NEDC – New European Driving Cycle<sup>18</sup>

▪ **Factores de emisión de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O.**

Las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O así como las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen del consumo energético. Los Factores de Emisión de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se estiman siguiendo el proceso mostrado más abajo:

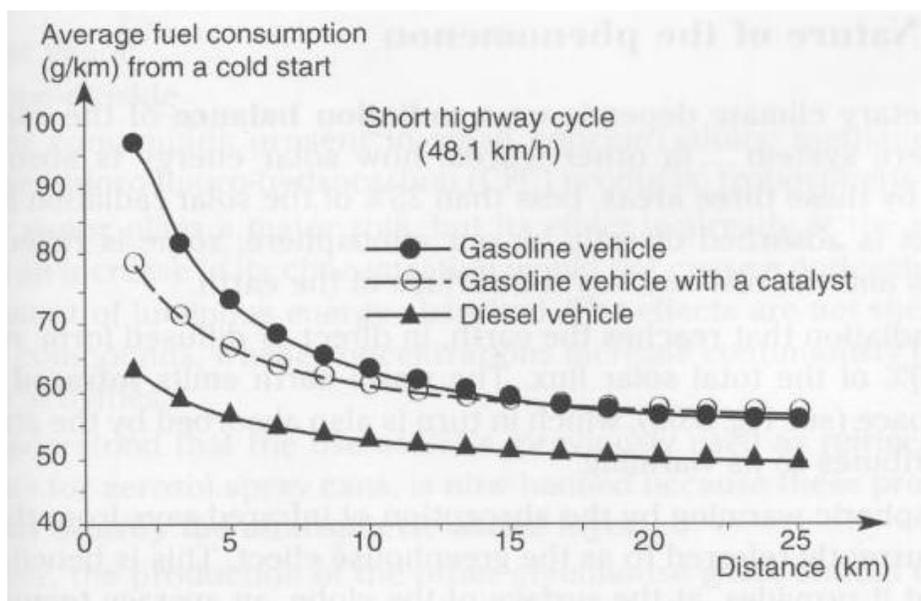


Figura 29. Consumo de combustible frente a distancia.<sup>16</sup>

De la figura 29 se asume un valor de consumo de combustible de 80 g/km para el motor gasolina y de 65 g/km par el motor diesel, que corresponde a 0.08 kg/km y 0.065 kg/km.

Teniendo en cuenta la densidad de los combustibles como se muestra en la tabla 8.

Combustible	Densidad (kg/L)	Combustible	CH <sub>4</sub> (g/L)	N <sub>2</sub> O (g/L)
Gasolina	0.762	Gasolina	0.32	0.58
Diesel	0.0845	Diesel	0.07	0.2

Tabla 8. Densidades de combustible

Tabla 9. Factores de Emisión CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O

Finalmente multiplicando 0.105 L/km por 0.32 g/L (valor obtenido de la tabla 9) se alcanza 0.034 g/km para CH<sub>4</sub>. Siguiendo el mismo proceso para el resto de valores se obtienen los resultados mostrados en la tabla 10.

Combustible	CH <sub>4</sub> (g/km)	N <sub>2</sub> O (g/km)
Petrol	0.034	0.061
Diesel	0.005	0.015

Tabla 10. Factores de emisión CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O utilizados en el modelo.

- **Escenarios de reducción de vehículos y emisiones.**

Se asumen tres Escenarios potenciales. La razón de una diferente reducción porcentual utilizada para vehículos de arranque en frío y vehículos de arranque en caliente en cada Escenario se debe a la suposición de que en un planteamiento más realístico, un sistema PRT desplazaría a un mayor volumen de trabajadores desde Valdebebas a la almendra central, considerados viajes de arranque en frío, que de trabajadores a la periferia o coronas exteriores, considerados viajes de arranque en caliente.

Se han asumido los siguientes valores porcentuales en base a los resultados del proyecto de instalación del tranvía en la ciudad británica de Leeds, para estimar las perspectivas de reducción de la presencia del coche en la carretera derivadas de la implementación del tranvía.

- Escenario 1. Optimista: 70% de reducción de los vehículos de arranque en frío que implica el mismo porcentaje de reducción de emisiones. 60% de reducción de vehículos de arranque en caliente que implica el mismo porcentaje de reducción de emisiones.
- Escenario 2. Real: 50% de reducción de los vehículos de arranque en frío que implica el mismo porcentaje de reducción de emisiones. 40% de reducción de vehículos de arranque en caliente que implica el mismo porcentaje de reducción de emisiones.
- Escenario 3. Pesimista: 30% de reducción de los vehículos de arranque en frío que implica el mismo porcentaje de reducción de emisiones. 20% de reducción de vehículos de arranque en caliente que implica el mismo porcentaje de reducción de emisiones

### **5.2.3. Resultados**

Los resultados derivados del modelo de emisiones se presentan en una hoja de cálculo de Microsoft Excel. En esta hoja de cálculo todos los factores descritos anteriormente se identifican claramente para ayudar a entenderlos.

## Modelización de emisiones producidas por el tráfico en el Parque de Valdebebas:

Zona transporte	GENERADOS				ATRAIDOS			
	TOTAL DÍA	Hora Punta		Total	TOTAL DÍA	Hora Punta		Total
		Internos	Externos			Internos	Externos	
1	2.234	36	243	279	119	1	14	15
2	2.218	36	241	277	656	5	77	82
3	1.517	25	165	190	144	1	17	18
4	3.252	53	354	406	254	2	30	32
5	1.408	23	153	176	126	1	15	16
6	881	14	96	110	207	2	24	26
7	1.946	32	212	243	6.804	48	677	726
8	565	10	64	73	1.081	9	126	135
9	1.271	21	138	159	789	7	92	99
10	1.517	25	165	190	484	4	56	61
11	706	11	77	88	388	3	45	48
12	706	11	77	88	300	3	35	38
13	1.650	27	179	206	216	2	25	27
14	0	0	0	0	1.421	12	166	178
15	694	11	76	87	4.431	37	517	554
16	0	0	0	0	7.762	65	905	970
17	0	0	0	0	14.280	119	1.686	1.785
18	862	14	94	108	1.055	9	123	132
19	0	0	0	0	4.921	41	574	615
20	0	0	0	0	4.704	39	549	588
21	0	0	0	0	2.625	22	306	328
22	555	9	60	69	37	0	4	5
23	502	8	55	63	34	0	4	4
24	0	0	0	0	1.540	13	180	193
25	0	0	0	0	12.268	102	1.431	1.533
26	0	0	0	0	3.778	32	441	472
27	2.530	41	275	316	2.836	24	331	354
28	1.472	24	160	184	1.468	12	171	183
<b>TOTAL</b>	<b>26.505</b>	<b>431</b>	<b>2.882</b>	<b>3.313</b>	<b>73.728</b>	<b>616</b>	<b>8.600</b>	<b>9.216</b>

Figura 30. Cálculo de Viajes generados y atraídos en Valdebebas. Hora punta<sup>11</sup>

### TOTAL TRÁFICO HORAS PUNTA

### TOTAL TRÁFICO 24 HORAS

Tráfico Generado	3.313	Tráfico Generado	26505
Tráfico Atraído	9.216	Tráfico Atraído	73.728
<b>Total Tráfico Horas Punta</b>	<b>12.529</b>	<b>Total Tráfico 24 Horas</b>	<b>100233</b>
<b>Distancia media recorrida (km)</b>	<b>10</b>	<b>Distancia media recorrida (km)</b>	<b>10</b>
<b>Motor Gasolina</b>	<b>5513</b>	<b>Motor Gasolina</b>	<b>44103</b>
Arranque en frío (40%)	2205	Arranque en frío (40%)	17641
Arranque en caliente (60%)	3308	Arranque en caliente (60%)	26462
<b>Motor Diesel uso privado</b>	<b>4886</b>	<b>Motor Diesel uso privado</b>	<b>39091</b>
<b>Motor Diesel pesados</b>	<b>2130</b>	<b>Motor Diesel pesados</b>	<b>17040</b>

## Parque de Valdebebas

### Emisiones modeladas según criterios estándar

(sin contar con el efecto de arranque en frío)

Unidades en kg

	<b>Motor Gasolina</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO2*</b>	<b>CH4*</b>	<b>N2O*</b>
Euro I	882	24	5	4	9				
Euro II	1.433	32	4	3	7				
Euro III	2.205	51	4	3	8				
Euro IV	992	10	1	1	2				
Euro V									
<b>Total</b>	5.513	116,2	14,1	11,1	25,2		9.923,0	1,9	3,4
	<b>Motor Diesel</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO2*</b>	<b>CH4*</b>	<b>N2O*</b>
Euro I	782	21	4	3	8	1			
Euro II	1.270	13	5	4	9	1			
Euro III	1.955	13	1	10	11	1			
Euro IV	880	4	0	2	3	0			
Euro V									
<b>Total</b>	4.886	50,9	10,6	19,5	30,1	3,3	6.352,2	0,2	0,7
<b>Total Acumulado</b>	10.399	167,0	24,7	30,6	55,3	3,3	16.275	2,1	4,1
Total Tráfico 24 Horas									
<b>Total Acumulado</b>	83.193	1336	197	245	442	26,5	130.203	17	33

\*la generación de CO2, CH4 y N2O depende del consumo, no de la temperatura, el mismo valor aplica a emisiones estándar y con arranque en frío

## Parque de Valdebebas

### Emisiones modeladas considerando el efecto de exceso por arranque en frío

Unidades en kg

#### *Emisiones de arranque en frío*

	<b>Motor Gasolina</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO2*</b>	<b>CH4*</b>	<b>N2O*</b>
Euro I	353	13,4	2,6	2,2	4,8				
Euro II	573	17,6	2,2	1,8	4,0				
Euro III	882	28,4	2,5	1,9	4,3				
Euro IV	397	5,6	0,6	0,4	1,0				
Euro V									
<b>Total</b>	2.205	64,9	7,9	6,2	14,1				

#### *Emisiones de arranque en caliente*

	<b>Motor Gasolina</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO2*</b>	<b>CH4*</b>	<b>N2O*</b>
Euro I	529	18,9	2,8	2,3	5,1				
Euro II	860	18,9	2,4	1,9	4,3				
Euro III	1.323	30,4	2,6	2,0	4,6				
Euro IV	595	6,0	0,6	0,5	1,1				
Euro V									
<b>Total</b>	3.308	74,2	8,5	6,7	15,1				
<b>Total Acumulado</b>	5.513	139,1	16,3	12,9	29,2				
+ vehículos diesel									
<b>Total en horas punta</b>	10.399	190	27	32	59	3,3	16.275	2,1	4,1

Total Tráfico 24 Horas

<b>Total Acumulado</b>	83.193	1520	215	259	474	26,5	16.275	2,1	4,1
------------------------	--------	------	-----	-----	-----	------	--------	-----	-----

\*la generación de CO2, CH4 y N2O depende del consumo, no de la temperatura, el mismo valor aplica a emisiones estándar y con arranque en frío

## Parque de Valdebebas

**Reducción de emisiones según criterios estándar** (sin contar con el efecto de arranque en frío)

Unidades en kg

### Escenario 1 Optimista (-65%)

	Vehículos	CO	HC	NOx	HC+NOx	PM	CO2*	CH4*	N2O*
Gasolina	3.528	74,3	9,0	7,1	16,1		6.351	1,2	2,2
Diesel	3.127	32,6	6,8	12,5	19,2	2,1	4.065	0,2	0,5
<b>Total horas punta</b>	6.655	107	16	20	35	2,1	10.416	1,4	2,6
<b>Total 24 horas</b>	53.244	855	126	157	283	17	83.330	11	21

### Escenario 2 Real (-45%)

	Vehículos	CO	HC	NOx	HC+NOx	PM	CO2*	CH4*	N2O*
Gasolina	2.426	51	6	5	11		4.366	0,8	1,5
Diesel	2.150	22	5	9	13	1,5	2.795	0,1	0,3
<b>Total horas punta</b>	4.576	73	11	13	24	1,5	7.161	0,9	1,8
<b>Total 24 horas</b>	36.605	588	87	108	195	12	57.289	7	14

### Escenario 3 Pesimista (-25%)

	Vehículos	CO	HC	NOx	HC+NOx	PM	CO2*	CH4*	N2O*
Gasolina	1.323	28	3	3	6		2.382	0,4	0,8
Diesel	1.173	12	5	5	9	0,8	1.525	0,1	0,2
<b>Total horas punta</b>	2.496	40	8	7	15	0,8	3.906	0,5	1,0
<b>Total 24 horas</b>	19.966	321	47	59	106	6	31.249	4	8

\*la generación de CO2, CH4 y N2O depende del consumo, no de la temperatura, el mismo valor aplica a emisiones estándar y con arranque en frío

## Parque de Valdebebas

### Reducción de emisiones considerando el efecto de exceso por arranque en frío

Unidades en kg

#### *Escenario 1 Optimista (-70% arranque en frío y -60% arranque en caliente)*

	<b>Vehículos</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO2*</b>	<b>CH4*</b>	<b>N2O*</b>
Total arranque en frío	1.544	45,4	5,5	4,4	9,9				
Total arranque en caliente	1.985	44,5	5,1	4,0	9,1				
<b>Total acumulado</b>	<b>3.528</b>	<b>90,0</b>	<b>10,6</b>	<b>8,4</b>	<b>18,9</b>		<b>6.351</b>	<b>1,2</b>	<b>2,2</b>
Total hora punta con Diesel	3.127	32,6	6,8	12,5	19,2	2,1	4.065	0,2	0,5
<b>Total 24 horas</b>	<b>53.244</b>	<b>973</b>	<b>138</b>	<b>166</b>	<b>303</b>	<b>17</b>	<b>10416</b>	<b>1</b>	<b>3</b>

#### *Escenario 2 Real (-50% arranque en frío y -40% arranque en caliente)*

	<b>Vehículos</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO2*</b>	<b>CH4*</b>	<b>N2O*</b>
Total arranque en frío	1.103	32,5	3,9	3,1	7,0				
Total arranque en caliente	1.323	29,7	3,4	2,7	6,1				
<b>Total acumulado</b>	<b>2.426</b>	<b>62,1</b>	<b>7,3</b>	<b>5,8</b>	<b>13,1</b>		<b>4.366</b>	<b>0,8</b>	<b>1,5</b>
Total hora punta con Diesel	2.150	22,4	4,7	8,6	13,2	1,5	2.795	0,1	0,3
<b>Total 24 horas</b>	<b>36.605</b>	<b>669</b>	<b>95</b>	<b>114</b>	<b>209</b>	<b>11,7</b>	<b>7.161</b>	<b>0,9</b>	<b>1,8</b>

#### *Escenario 3 Pesimista (-30% arranque en frío y -20% arranque en caliente)*

	<b>Vehículos</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO2*</b>	<b>CH4*</b>	<b>N2O*</b>
Total arranque en frío	662	19,5	2,4	1,9	4,2				
Total arranque en caliente	662	14,8	1,7	1,3	3,0				
<b>Total acumulado</b>	<b>1.323</b>	<b>34,3</b>	<b>4,1</b>	<b>3,2</b>	<b>7,3</b>		<b>2.382</b>	<b>0,4</b>	<b>0,8</b>
Total hora punta con Diesel	1.173	12,2	2,5	4,7	7,2	0,8	1.525	0,1	0,2
<b>Total 24 horas</b>	<b>19.966</b>	<b>365</b>	<b>52</b>	<b>62</b>	<b>114</b>	<b>6,4</b>	<b>3.906</b>	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>

\*la generación de CO2, CH4 y N2O depende del consumo, no de la temperatura, el mismo valor aplica a emisiones estándar y con arranque en frío

## Desplazamientos de 5 km – Almendra Central

Como ejemplo para mostrar la incidencia del arranque en frío en las emisiones se calculan las emisiones con las mismas condiciones del Parque de Valdebebas pero reduciéndola distancia de desplazamiento a 5 km, como puede darse en la Almendra Central

<b>Emisiones modeladas según criterios estándar</b> (sin contar con el efecto de arranque en frío)						Unidades en kg			
	<b>Motor Gasolina</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO2*</b>	<b>CH4*</b>	<b>N2O*</b>
Euro I	882	24	5	4	9				
Euro II	1.433	32	4	3	7				
Euro III	2.205	51	4	3	8				
Euro IV	992	10	1	1	2				
Euro V									
<b>Total</b>	5.513	116,2	14,1	11,1	25,2		9.923,0	1,9	3,4
	<b>Motor Diesel</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO2*</b>	<b>CH4*</b>	<b>N2O*</b>
Euro I	782	21	4	3	8	1			
Euro II	1.270	13	5	4	9	1			
Euro III	1.955	13	1	10	11	1			
Euro IV	880	4	0	2	3	0			
Euro V									
<b>Total</b>	4.886	50,9	10,6	19,5	30,1	3,3	6.352,2	0,2	0,7
<b>Total Acumulado</b>	10.399	167,0	24,7	30,6	55,3	3,3	16.275	2,1	4,1
Total Tráfico 24 Horas									
<b>Total Acumulado</b>	83.193	1336	197	245	442	26,5	130.203	17	33

\*la generación de CO2, CH4 y N2O depende del consumo, no de la temperatura, el mismo valor aplica a emisiones estándar y con arranque en frío

## Desplazamientos de 5 km – Almendra Central

### Emisiones modeladas considerando el efecto de exceso por arranque en frío

Unidades en kg

#### *Emisiones de arranque en frío*

	<b>Motor Gasolina</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO2*</b>	<b>CH4*</b>	<b>N2O*</b>
Euro I	353	13,4	2,6	2,2	4,8				
Euro II	573	17,6	2,2	1,8	4,0				
Euro III	882	28,4	2,5	1,9	4,3				
Euro IV	397	5,6	0,6	0,4	1,0				
Euro V									
<b>Total</b>	2.205	64,9	7,9	6,2	14,1				

#### *Emisiones de arranque en caliente*

	<b>Motor Gasolina</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>PM</b>	<b>CO2*</b>	<b>CH4*</b>	<b>N2O*</b>
Euro I	529	18,9	2,8	2,3	5,1				
Euro II	860	18,9	2,4	1,9	4,3				
Euro III	1.323	30,4	2,6	2,0	4,6				
Euro IV	595	6,0	0,6	0,5	1,1				
Euro V									
<b>Total</b>	3.308	74,2	8,5	6,7	15,1				
<b>Total Acumulado</b>	5.513	139,1	16,3	12,9	29,2				
+ vehículos diesel									
<b>Total en horas punta</b>	10.399	190	27	32	59	3,3	16.275	2,1	4,1

Total Tráfico 24 Horas

<b>Total Acumulado</b>	83.193	1520	215	259	474	26,5	16.275	2,1	4,1
------------------------	--------	------	-----	-----	-----	------	--------	-----	-----

\*la generación de CO2, CH4 y N2O depende del consumo, no de la temperatura, el mismo valor aplica a emisiones estándar y con arranque en frío

### 5.3. Impacto visual

La estructura permanente consiste en una estructura vial ligera que puede ser ubicada elevada, en superficie o subterránea, similar al vial de una montaña rusa. Su impacto visual en entornos urbanos puede ser reducido instalado el vial paralelo o sobre las calles y carreteras existentes. En el caso del Parque de Valdebebas la amplitud de las calles y carreteras previstas suponen un escenario idóneo, ya que siguiendo el trazado de la carretera la intrusión visual se minimizaría. Para dar una idea aproximada se puede tomar la imagen de las farolas como si estuvieran unidas por un vial en su parte superior, ya que esta es la misma configuración básica de la estructura vial, como se puede apreciar en la figura 31.



Figura 31. Pista de prueba de Vectus en Uppsala, Suecia.<sup>1</sup>

Dimensiones generales de una estructura vial para PRT elevado:

Ancho:	0,9 m
Profundidad:	0,7 m
Distancia entre columnas	20 m
Diámetro de columna	0,5 m

El tamaño de las estaciones de acceso a la red pueden variar su tamaño dependiendo de la capacidad de transporte necesaria, en la figura 32 se muestra la imagen de una estación con capacidad para 2 andenes.



Figura 32. Estación de 2 andenes en la pista de pruebas Vectus en Uppsala, Suecia.<sup>1</sup>

#### **5.4. Impacto sonoro y niveles de ruido**

Las posibles fuentes de ruido son la motorización, el rozamiento y la aerodinámica.

Al tratarse de vehículos eléctricos su impacto sonoro por motorización se considera insignificante comparado con el producido por un vehículo con motor de combustión interna. Para reducir el nivel de ruido producido por el rozamiento las ruedas están compuestas de un material plástico que al contacto con el vial metálico minimiza el impacto sonoro. El ruido relacionado con la aerodinámica de un vehículo en movimiento es significativo a partir de los 40 -50 km/h, velocidades máximas a las que circulará un vehículo PRT por lo que su impacto sonoro igualmente se considera mínimo.

De esta manera, se estima una reducción de los niveles de ruido comparable a la estimada en Estudio Ambiental llevado a cabo para la implantación de un tranvía en la ciudad de Leeds, Reino Unido que fija una reducción del 15%<sup>14</sup> por la menor presencia del tráfico rodado, sobre la media, que en el caso de la zona de ejemplo de Sanchinarro como similar al Parque de Valdebebas es de 62 dB, LAeq.<sup>13</sup>

### **5.5. Impacto en Flora y Fauna**

No se considera un impacto significativo en la Flora y Fauna al tratarse de entornos urbanos. Se valora en todo caso impactos positivos derivados de la reducción de la contaminación y compuestos químicos tales como glicol, derrames de aceite, reducción de la oxidación por la disminución del uso de la presencia del vehículo. Se considera que la estructura vial y los vehículos eléctricos de un sistema PRT no representan un riesgo para las aves.

### **5.6. Impacto en el uso del suelo**

Se estima que un sistema PRT requiere un 0,02% del suelo disponible en contraste con el 30 – 70% del requerimiento de suelo para las infraestructuras de carreteras y vehículos rodados. Peatones, ciclistas, espacios verdes y edificios sustituirán el suelo dedicado a carreteras y zonas de aparcamiento.

### **5.7. Impacto social**

Como modo de transporte público un sistema PRT generaría impactos sociales positivos. Los siguientes parámetros fueron identificados en la conferencia EDICT en Cardiff, Reino Unido el 26 y 27 de octubre de 2004 por un grupo independiente de consultores formado por las empresas IABG, CDV, CIRT & CRES.

- Ahorro directo de tiempo de viaje usando el PRT.
- Ahorro indirecto de tiempo de viajes por reducción del uso del vehículo.
- Ahorro energético directo comparado con otros sistemas
- Ahorro energético indirecto por reducción de la congestión y del uso del vehículo.
- Reducción indirecta de los accidentes de coche.
- Potencial para reducir la conducción bajo el efecto del alcohol y las drogas.
- Mejora de la equidad.
- Uso del tiempo durante el trayecto en PRT frente al coche.

- Reducción general de impactos ambientales (recursos para producción, operación y residuos)
- Bajos niveles de ruido.
- Mejora de las condiciones de vida en la ciudad.

### 5.7.1. Mejora del tiempo de trayecto

La figura 33 muestra el tiempo perdido en congestión en función de la distribución horaria, como se puede observar los mayores porcentajes de pérdida se produce durante los picos del flujo del tráfico en las mañanas y en las tardes. Con la reducción de la presencia de vehículos en las carreteras debido al mayor uso del transporte público y la intermodalidad del un sistema PRT mejoraría el tiempo de trayecto.

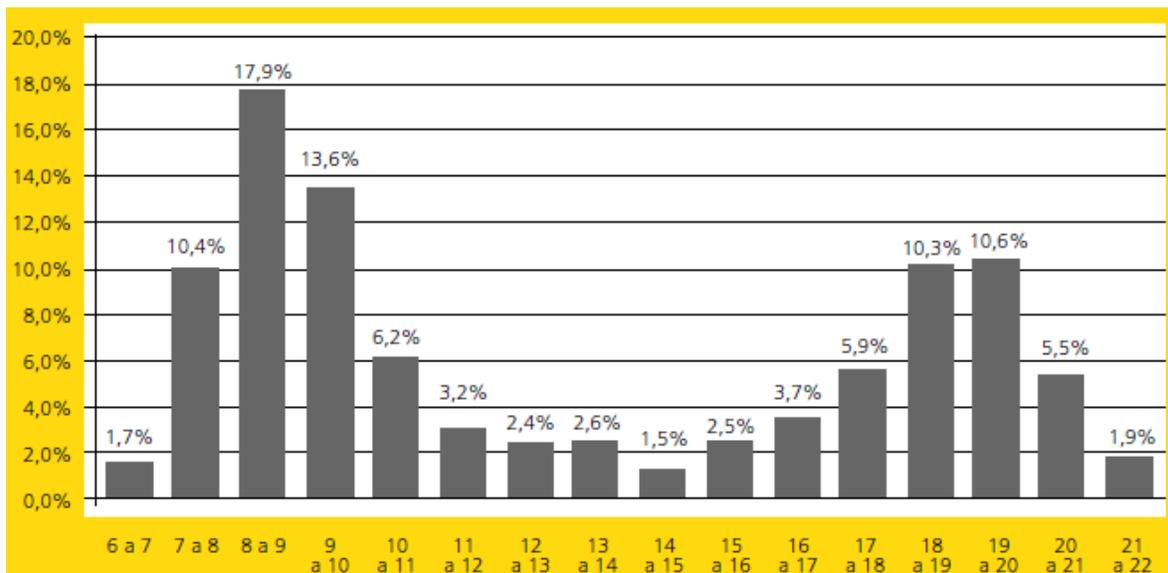


Figura 33. Distribución por período horario del tiempo perdida en congestión en Madrid.<sup>8</sup>

### 5.7.2. Mejora de la seguridad vial

Como se muestra en la figura 34 la accidentalidad en Madrid ha aumentado en términos absolutos desde el año 2003. Debido a que un sistema PRT se desplaza en su propio y vial y este puede ir elevado se reduce el riesgo de atropellos de peatones. De igual manera la menor presencia de vehículos en las carreteras reduciría potencialmente el número de colisiones vehículos.

	2003	2004	2005
atropellos	1.777	1.587	1.889
caída bicicleta	29	35	52
colisión doble	11.251	11.032	11.874
colisión múltiple	1.523	1.376	1.295
caída ciclomotor	306	337	331
colisión contra objeto fijo	4.256	4.129	4.648
caída motocicleta	379	414	589
caída viajero bus	96	117	104
vuelco	244	201	188
otras causas	576	635	665
<b>TOTAL ACCIDENTES</b>	<b>20.437</b>	<b>19.863</b>	<b>21.635</b>

Figura 34. Tipos de accidente en el Municipio de Madrid<sup>19</sup>

### 5.8. Impacto económico

En el proyecto financiado por la Cámara de Comercio de Estocolmo mencionado anteriormente también se comparan los costes capitales y operativos en base a pasajero por kilómetro recorrido entre el autobús, el metro, el metro ligero y el tren de cercanías en Estocolmo. Los resultados más destacables son los siguientes:

- El sistema PRT es el modo de transporte público urbano más económico en un amplio rango de demanda de pasajeros.
- El autobús es el segundo modo de transporte más económico pero tiene una capacidad limitada.
- El metro ligero es más económico que el tren de cercanías hasta 25.000 pasajeros por día (en ambos sentidos).

Sobre el rango completo de niveles de demanda, el coste capital más el coste operativo de pasajero por kilómetro recorrido para el sistema PRT es menos de 1/3 que el metro ligero y también más económico que el autobús en baja demanda, como se puede observar en la figura 35.

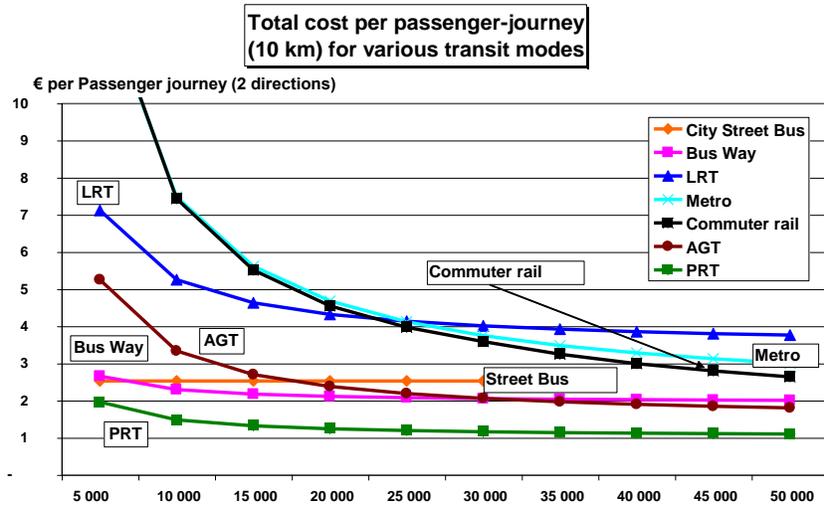


Figura 35. Comparativa de costes entre diferentes modos de transporte.<sup>9</sup>

Sobre el efecto de la reducción del uso del vehículo privado se puede destacar la influencia en el coste que tiene el tiempo en transporte privado como causa de la congestión.

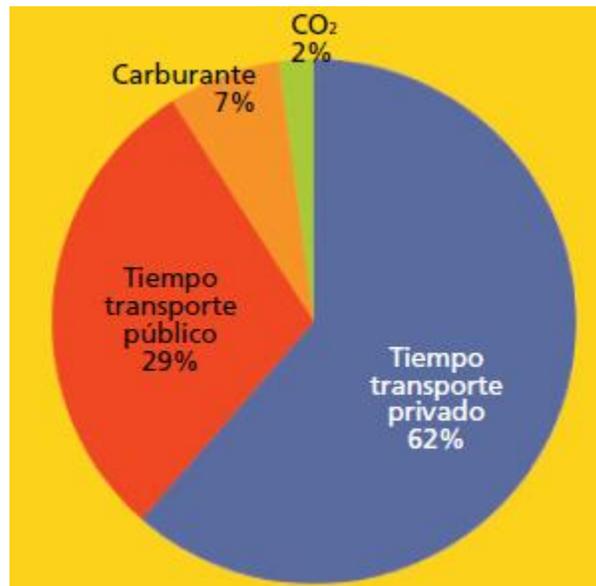


Figura 36. Distribución del coste total de la congestión.<sup>8</sup>

## 6. Análisis y conclusiones

En el contexto actual la contaminación urbana tiene cada día más peso, la ciudad de Madrid y otras ciudades españolas han sido testigos recientemente del aumento de los niveles de algunos contaminantes por encima de los límites legalmente establecidos y con poca capacidad de reacción para evitar el problema. El principal causante de la contaminación del aire urbano es el tráfico, cuyo crecimiento se ha detenido levemente en la coyuntura económica actual pero que ha registrado importantes crecimientos que una vez superada la situación económica es previsible retome la tendencia alcista. Los motivos de este continuo incremento del tráfico como son el crecimiento de la población, el aumento de la dispersión entre el lugar de residencia y el lugar del trabajo conllevan una mayor dependencia del vehículo privado para realizar los trayectos, ya que el desarrollo de infraestructuras de transporte público que den servicio a la demanda no pueden competir con el servicio de libertad de movimiento y privacidad que ofrece el vehículo privado.

De forma práctica, la reducción de emisión de gases contaminantes derivados del transporte debe llevarse a cabo cuanto antes, especialmente en viajes cortos y con temperaturas bajas.

Las condiciones de prueba actuales para medir los niveles de contaminantes que producen los vehículos se llevan a cabo a temperaturas ambiente de 20-22°C que representan una suposición incierta para una operativa diaria, ya que únicamente en algunas regiones de España y Grecia disponemos de meses con esa media de temperatura en toda Europa.

De los resultados de la modelización de emisiones podemos extraer que la incidencia del exceso de emisiones por efecto del arranque en frío aumenta significativamente cuando la distancia recorrida es menor.

### ***Impacto en las emisiones debido al arranque en frío, %***

CO	HC	NOx	HC+NOx
19,8	15,9	15,9	15,9

Tabla 11. Impacto en el Parque de Valdebebas

### ***Impacto en las emisiones debido al arranque en frío, %***

CO	HC	NOx	HC+NOx
62,5	58,3	58,2	58,2

Tabla 12. Impacto en la Almendra Central

El tipo de trayecto que se realiza en la Almendra Central y entre la periferia es un claro ejemplo de este tipo de desplazamientos a los cuales se les puede ofrecer una mejora del servicio de transporte público con sistemas que acorten el tiempo de transporte y la combinación intermodal.

En resumen, un sistema de transporte público y eléctrico que sustituya el uso del coche proporciona las ventajas de reducir drásticamente la contaminación y mejorar la calidad del aire urbano, así como de reducir la dependencia de combustibles fósiles, de especial relevancia hoy en día, como del resto de impactos positivos asociados.

## 7. Referencias y bibliografía

### Referencias

1. Web de la empresa Vectus  
<http://www.vectuspert.com/>
2. Web sobre la historia de los sistemas PRT  
<http://faculty.washington.edu/~jbs/itrans/PRT/History.html>
3. Ebook publicado sobre el proyecto PRT Aramis PRT en Francia  
<http://www.ifi.uio.no/inis/foiler/h01/aramis-foiler.pdf>
4. Ebook publicado sobre el proyecto PRT Aramis PRT en Francia  
<http://www.si.umich.edu/~pne/PDF/latour.pdf>
5. Web sobre la historia de los sistemas PRT  
<http://faculty.washington.edu/~jbs/itrans/history.htm>
6. Wikipedia web para PRT  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Personal\\_Rapid\\_Transit](http://en.wikipedia.org/wiki/Personal_Rapid_Transit)
7. Monzón, Andrés y De la Hoz, Daniel (2009). “*Efectos sobre la movilidad de la dinámica territorial de Madrid*” Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio Escuela Técnica Superior de Arquitectura - Universidad Politécnica de Madrid
8. Fundación RACC (2009). “*La congestión en los corredores de acceso a Madrid*”
9. Tegnér, Göran. *PRT Cost Comparison*, (TRANSEK Consultants) AATS Bologna Conferencia (7-8 Nov, 2005)
10. Guibet, J.C. *Fuels and Engines*, (Technip), (Institut Français du Pétrole Publications), (1999)
11. Estudio, Proyectos y Planificación, S.A.(2007) “*Estudio de tráfico del Plan Parcial Ciudad Aeroportuaria Parque de Valdebebas*”
12. Anderson, J. Edward. *The Future of High-Capacity PRT*, (PRT International) AATS Bologna Conferencia (7-8 Nov, 2005)
13. Ayuntamiento de Madrid, Servicio de Calidad del Aire.  
<http://www.mambiente.munimadrid.es/openccms/openccms/calaire/index.html>
14. West Yorkshire Local Transport Plan 2, *Strategic Environmental Assessment (SEA)*, (Metro), (2005)
15. DCW Blaikley, AP Smith, EA Feest and AH Reading. *UG219 TRAMAQ: Cold Start Emissions. Summary Report*, (AEA Technology), (2001)
16. Andrews, Gordon. *Transport Engine Emissions – PREN 2410 lecture notes*, (University of Leeds),(2006)
17. ARGEA Consultores S.L. para la Dirección General de Economía, Estadística e Innovación Tecnológica, Consejería de Economía y Hacienda, Comunidad de Madrid (2010) “*Atlas de la Movilidad residencia-trabajo en la Comunidad de Madrid*”
18. Andrews, Gordon. *Greenhouse gases - PREN3450 lecture notes*, (University of Leeds),( 2006)
19. Área de Gobierno de Seguridad y de Servicios de la Comunidad de Madrid. (2007) “*Plan de Seguridad Vial 2007*”

## Bibliografía

Cuando se ha mencionado un documento en las referencias no se repite en la bibliografía. Sin embargo, la mayoría de los documentos, si no todos, mencionados en las referencias también han sido usados como bibliografía.

- Black, Ian. *Advanced Urban Transport*, (Saxon House),(1975)
- Irving, Jack H. *Fundamentals of Personal Rapid Transit*, (Lexington Books),(1978)
- Watkins, L.H. *Environmental Impact of Roads and Traffic*, (Applied Science), (1981)
- Eastwood, Peter. *Critical Topics in Exhaust Gas Aftertreatment*, (Research Studies Press),(2000)
- Advanced Automated Transit Association Bologna Conference (7-8 Nov, 2005)  
This conference was attended by the author of this project in the mentioned date.
- PRT News Webpage  
<http://kinetic.seattle.wa.us/nxtlevel/prt/othernews.html>
- Ministerio de Fomento, Gobierno de España. (2005) “*Plan Estratégico de Infraestructuras y Transportes*”
- Dirección General de Tráfico, Gobierno de España  
<http://www.dgt.es/>
- Gutiérrez Puebla, Javier y García Palomares, Juan Carlos (2005) “*Cambios en la movilidad en el área metropolitana de Madrid: el creciente uso del transporte privado*” Departamento de Geografía Humana. Universidad Complutense de Madrid
- Gutiérrez Puebla, Javier y García Palomares, Juan Carlos “*Movilidad por motivo trabajo en la Comunidad de Madrid*” Revista del Instituto de Estudios Económicos, 1-2, 223-56.
- Observatorio de la Movilidad Metropolitana (2008) “*Informe OMM 2008*”
- Ruiz, Rodolfo Manuel. “*Material académico Módulo 1 – Contaminación atmosférica*” Máster Profesional en Ingeniería y Gestión Medioambiental, edición 2008-2009, Escuela de Organización Industrial.
- Díaz, Manuel. “*Material académico Módulo 5 – Evaluación de Impacto Ambiental*” Máster Profesional en Ingeniería y Gestión Medioambiental, edición 2008-2009, Escuela de Organización Industrial.