

PROGRAMA PROFIT
PROYECTO: SISTEMA DE PREFERENCIA
AL TRANVÍA
PREFTRAN

febrero, 2004



ETRA I+D, S.A.



1. Introducción

El proyecto consiste en concebir, definir y desarrollar una estrategia de control de tráfico en intersecciones semaforizadas que favorece la gestión del transporte público centrándose especialmente en la preferencia a líneas de tranvías.

La estrategia favorece el transporte público de superficie en el que se comparte el espacio viario con el tráfico correspondiente a vehículos particulares.

Se ha diseñado una estrategia de control que permite a los responsables de la gestión del transporte público y a los responsables de la gestión del tráfico adaptar esta estrategia al cambio del comportamiento del transporte y el tráfico de acuerdo con la evolución de cada red viaria o al cambio de las políticas de gestión de dicha red.

La gestión de la prioridad semafórica del transporte público tiene como factor fundamental definir el punto de equilibrio entre cuanto se favorece al transporte público y cuanto se perjudica al tráfico privado. Este punto de equilibrio es distinto según los tipos de transporte público, tipos de ciudad, zonas de ciudad, etc. También depende de decisiones políticas, en las que cada administración tiene enfoques distintos de un mismo problema.

2. Proceso de desarrollo del proyecto

Para este proyecto se ha seguido el ciclo de vida habitual de diseño y desarrollo de hardware y software. Las fases en las que se ha estructurado el proyecto son las siguientes:

- Requerimientos de Usuario (RU)
- Diseño de la Arquitectura del Hardware (DAH)
- Diseño de la Arquitectura del Software (DAS)
- Diseño detallado del Hardware (DDH)
- Diseño detallado del Software (DDS)
- Transferencia del Hardware (TRH)
- Transferencia del Software (TRS)

Las tareas principales a desarrolladas son las siguientes:

Tarea	Descripción
Fase RU	Esta es la fase de Requerimientos de Usuario en la que se concibe el equipo y se especifica su funcionalidad.
T01 DRU	Se realiza la concepción del producto y se elabora el documento de requerimientos de usuario donde se define toda la funcionalidad del producto.
T03 PVV/PA	Se desarrolla el plan de verificación y validación del producto donde se establecen las pruebas a realizar para determinar que los requerimientos descritos en el DRU son cubiertos por el producto.
Fase DAS	Descomposición del software en cada uno de sus componentes básicos.
T11 DDAS	Se realiza el diseño de la arquitectura del software generando la descomposición del software en componentes y definiendo los interfaces y las interacciones entre los componentes.
Fase DDS	Diseño detallado de los componentes software.
T30 Sistema Básico	Diseño detallado y codificación del componente Sistema Básico.
T31 Gestión Planes Sin coordinación	Diseño detallado y codificación del componente Gestión Planes Sin coordinación.
T32 Ordenes de Configuración	Diseño detallado y codificación del componente Ordenes de Configuración.
T33 Gestión del Automata	Diseño detallado y codificación del componente Gestión del Automata.
T34 Registro de Alarmas e incidencias	Diseño detallado y codificación del componente Registro de Alarmas e incidencias.
T35 Simulador Tranvía	Diseño detallado y codificación del componente Simulador Tranvía.
T36 Gestión de salidas	Diseño detallado y codificación del componente Gestión de salidas.
T37 Gestión de Planes con coordinación	Diseño detallado y codificación del componente Gestión de Planes con coordinación.
T38 Gestión de Prioridad Total	Diseño detallado y codificación del componente Gestión de Prioridad Total.
T39 Gestión de Grupos Especiales	Diseño detallado y codificación del componente Gestión de Grupos Especiales.
T25 PRUEBAS DE SISTEMA	Se realizan las pruebas de todo el sistema.
Fase TRS	En esta fase se finaliza la documentación del producto para permitir su explotación y mantenimiento.
T20 DT	Documento de transferencia del software con información para su construcción e instalación.

En la siguiente tabla se indican los hitos más importantes del proyecto.

Hitos principales del proyecto

Hito	Mes	Descripción
H1	2	Documento de Requerimientos de Usuario
H2	6	Prototipo SW
H3	12	Prueba producto completo

3. Resultados obtenidos

Este proyecto se ha centrado en la concepción, diseño y desarrollo de un modelo de preferencia al transporte público para el regulador de tráfico (RegCD). Este modelo se centra especialmente a las líneas de tranvías.

PrefTran da solución a la regulación local, a nivel de cruce, contemplando al tranvía como vehículo prioritario. PrefTran funciona con dos estrategias:

1. La primera estrategia favorece más el tráfico privado, adaptando por micro regulación la onda verde al paso de cada tranvía.
2. La segunda, favorece más al tranvía y permite mayores modificaciones de los parámetros del plan de tráfico para dar prioridad.

PrefTran se integra dentro de las funcionalidades del RegCD. El conjunto de funcionalidades requeridas se ha añadido a los distintos componentes del RegCD. Estas funcionalidades afectan a la gestión de las salidas y a la gestión de planes por lo que se han desarrollado los siguientes componentes:

- Gestión de Grupos semafóricos con preferencia al tranvía.
- Gestión de planes de tráfico con preferencia al tranvía.

Gestión de la Preferencia

El objetivo de PrefTran es que el tranvía no se detenga en su trayecto, o en caso de que esto no sea posible, que espere el mínimo tiempo posible. Para ello se calculará el instante en que llegará el tranvía al cruce, y programará una fase o secuencia de fases compatibles con el tranvía, de forma que desde el instante previsto de llegada, y durante la duración del trayecto del tranvía, sea posible introducir el movimiento o secuencia de movimientos correspondientes al trayecto del tranvía.

Cuando las condiciones del tráfico determinen una coordinación entre los cruces atravesados por el tranvía, la onda verde se calcular teniendo en cuenta las necesidades

del tranvía. La onda verde permite al tranvía ir encontrando verde a su paso por los diferentes cruces. PrefTran modifica localmente la onda verde para adaptarse a posibles desviaciones del tranvía en su trayecto.

En los cruces en que no sea posible establecer una fase o secuencia de fases compatibles con el tranvía, se introduce una nueva fase o secuencia de fases. Estas fases sólo salen cuando sean demandadas por la presencia del tranvía.

Señalización de la Preferencia

Como cualquier otro vehículo, el tranvía está sujeto a la señalización obligatoria mediante semáforos. Los movimientos del tranvía están regulados por los grupos semafóricos correspondientes.

Adicionalmente, el tranvía dispone de señalización de preaviso de carácter informativo que indica al conductor del tranvía el estado de PrefTran. En concreto, informa si PrefTran ha detectado al tranvía, y señala con antelación los cambios del grupo semafórico del tranvía.

El conductor del tranvía conoce, antes de llegar al punto de decisión, si puede atravesar el cruce sin modificar su marcha.

Detección del Tranvía

PrefTran conoce la llegada de un tranvía con la suficiente antelación, cuándo va a entrar el tranvía en el cruce y cuando sale de él. Para ello se instalan tres detectores que se activan con el paso del tranvía. El primero es el detector de aproximación, situado antes del punto de decisión y de forma que permite a PrefTran conocer la llegada del tranvía con la antelación suficiente según la estrategia establecida. El segundo es el detector de línea de parada, situado justo antes del cruce. El tercero es el detector de cancelación, situado a la salida del cruce.

Se sitúan tres detectores en la plataforma del tranvía. El primero según el sentido de la marcha es el detector de aproximación. El segundo es el detector de línea de parada. El tercero es el detector de cancelación.

Semáforos del tranvía

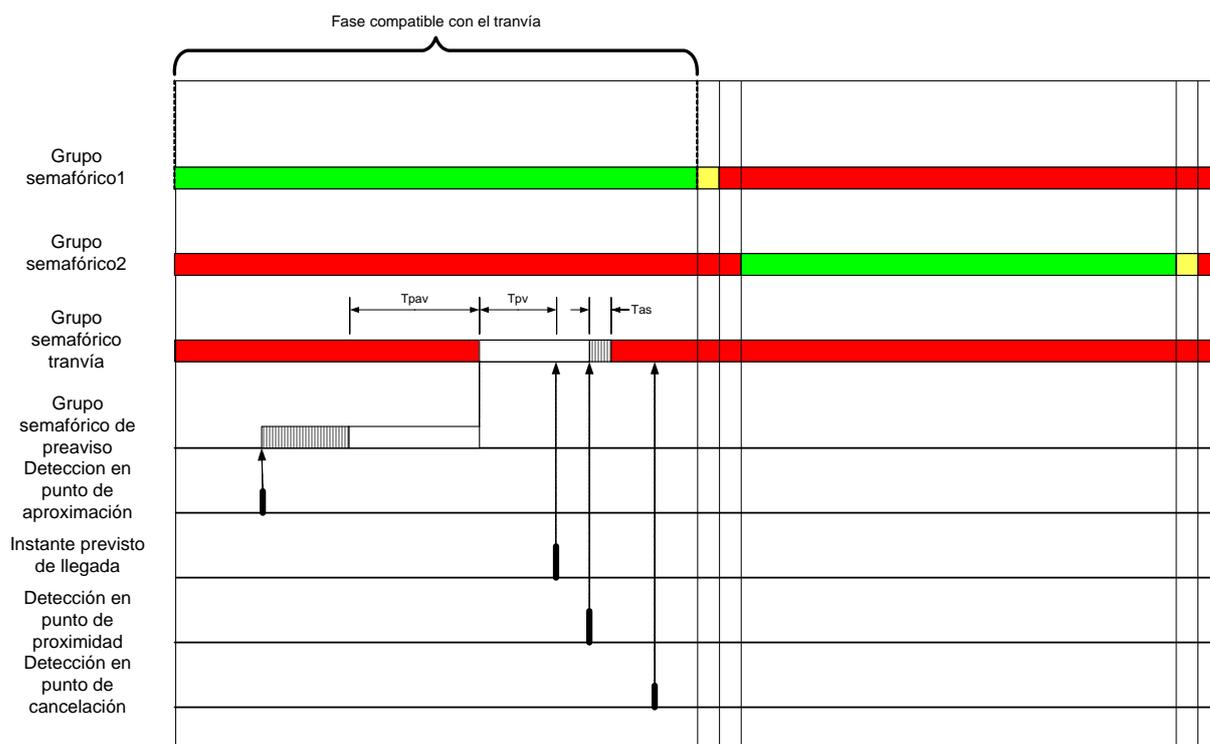
Los semáforos tienen dos o tres focos. Un foco con una raya blanca horizontal (H o rojo) es equivalente al rojo de vehículos e indica al tranvía que no tiene paso. Un foco con una raya blanca vertical (V o verde) indica al tranvía que tiene paso libre al frente, es equivalente al verde para vehículos. Un foco con una raya blanca inclinada indica al tranvía que tiene paso libre para el giro indicado. Una raya blanca vertical o inclinada intermitente (ámbar) indica que el tranvía no tiene paso y va a pasar al estado H. Es equivalente al ámbar para vehículos. Si el tranvía está antes del punto de decisión debe detenerse, si ya lo ha rebasado debe continuar y pasar cuanto antes.

Prioridad Máxima

El objetivo de la estrategia de prioridad máxima es conseguir que en el instante previsto de llegada el ciclo esté en situación interrumpible, para poder introducir en este punto la fase del tranvía.

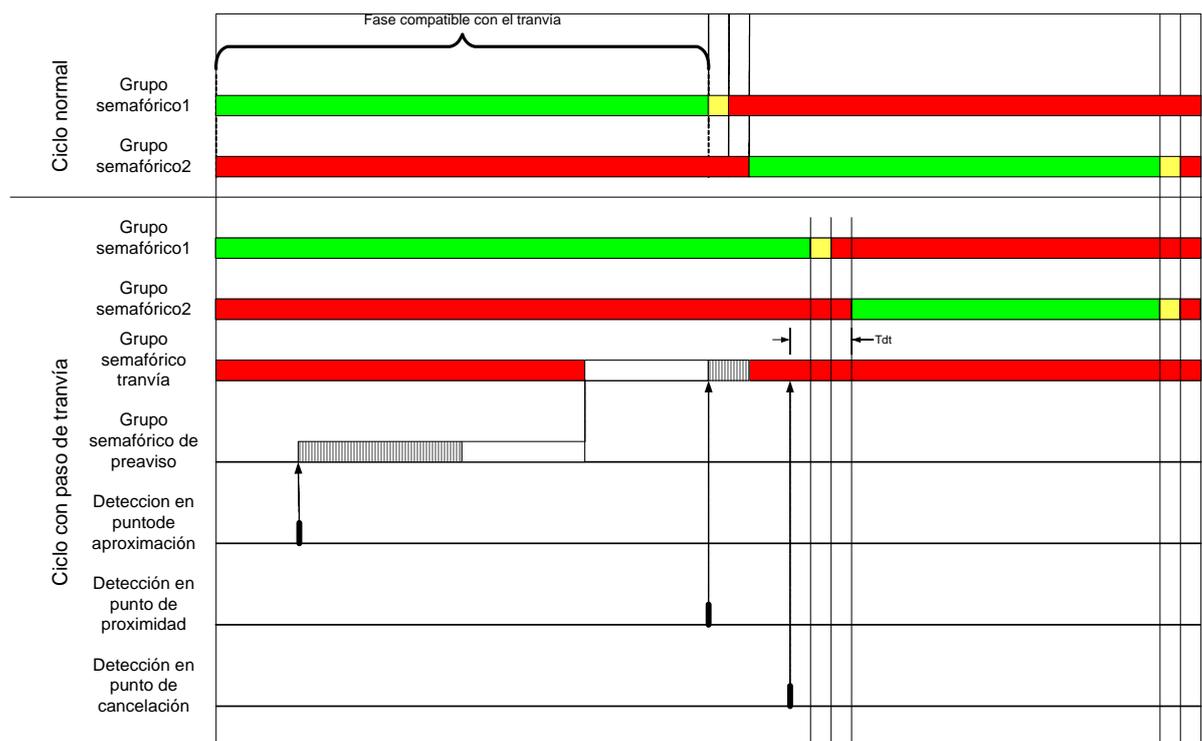
Cuando PrefTran funciona por prioridad máxima, se puede interrumpir la secuencia normal de fases para introducir la fase del tranvía.

La fase del tranvía puede ser una fase de la estructura en curso u otra fase definida específicamente para el paso del tranvía.



Prioridad total y la fase del tranvía es una fase de la estructura.
El tranvía llega durante la fase compatible.

Cuando se activa D_a se calcula la ventana de verde pedida por el tranvía ($T_{pv} + T_{lp}$ a partir de $I_{pp} - T_{pv}$). Si al comienzo de la ventana va a estar la fase del tranvía se esperará a la salida del tranvía, es decir, hasta el fin del despeje del tranvía, antes de dar verde a la fase siguiente. Si el despeje del tranvía termina dentro del tiempo normal de la fase, el tranvía habrá podido pasar sin afectar al tráfico. En caso contrario la fase del tranvía se alargará el tiempo necesario: hasta el instante de fin de despeje del tranvía menos la duración de la transición de la fase del tranvía a la fase siguiente.



Prioridad total y la fase del tranvía es una fase de la estructura. El tranvía llega durante la fase compatible. Hay que extender la fase.

Cuando en el instante $I_{pp-Tpav}$ no vaya a estar la fase del tranvía, se deberá interrumpir la fase que haya en ese instante para introducir la fase del tranvía. Para ello deberá estar en situación interrumpible en $I_{pp-Tpav-Teft}$.

Suponiendo que se puede interrumpir la fase en el instante $I_{pp-Tpav-Teft}$, se terminará la fase dando paso a la transición de entrada a la fase del tranvía. La transición terminará en $I_{pp-Tpav}$, instante en que comenzará la fase del tranvía y se dará verde a éste. La fase del tranvía se mantendrá hasta la salida del tranvía.

Si en el instante previsto de llegada ($I_{pp-Tpav-Teft}$) del tranvía el ciclo no va a estar en una situación interrumpible, PrefTran podrá elegir entre alargar la fase anterior a la activa en dicho instante, de forma que en el instante previsto de llegada se pueda terminar dicha fase y pasar a la fase del tranvía, o acortarla en el tiempo suficiente para que cuando llegue el tranvía ya haya vencido el tiempo mínimo de la fase que provocaba el conflicto.

Si las dos opciones son posibles, la elección entre alargar o acortar la duración de la fase se hará teniendo en cuenta las restricciones de incremento máximo (T_{miv}) y máximo tiempo de rojo para los grupos (T_{mr}).

Si las dos opciones cumplen las restricciones se escogerá la que implique una menor modificación del tiempo de la fase.

La vuelta al ciclo normal se hará a la fase siguiente a la que se interrumpió, a menos que quede tiempo suficiente para que pueda salir la transición correspondiente y el tiempo mínimo de la fase interrumpida.

La llegada del tranvía debe ser conocida con la suficiente antelación (T_{ma}). Este tiempo debe ser superior al mayor de los intervalos no interrumpibles del ciclo más la transición de entrada a la fase del tranvía más el tiempo de preverde.

$$T_{ma} = \max(T_{ef} + V_{mf}) + T_{pv} + T_{eft}$$

Siendo T_{ef} la transición de entrada a la fase f , y V_{mf} el tiempo mínimo de la fase f . Si la fase del tranvía es una fase específica f será cualquier fase del plan. Si la fase del tranvía es una fase del plan f será cualquier fase del plan excepto la del tranvía.

El tiempo mínimo de activación (T_{ma}) condicionará la distancia mínima a que deberá situarse el detector de aproximación. Deberá ser como mínimo la distancia que recorre el tranvía durante T_{ma} circulando a la velocidad nominal en ese tramo.

Si se cumple esta condición, se tendrá el suficiente margen de actuación para permitir para que cualquier tranvía que llegue a D_a estando el sistema en reposo pueda atravesar el cruce sin detenerse.

Si el plan en curso es un plan semiactuado, sólo se tendrá en cuenta las secuencias en las que el ciclo sea interrumpible en el instante previsto de llegada, independientemente de las demandas activas. Si ninguna secuencia es interrumpible en el instante previsto de llegada se aplicará el criterio descrito anteriormente a cada una de las secuencias posibles según las demandas actuales y se elegirá la mejor entendiendo que es mejor si modifica menos los tiempos.

El posible desfase generado al dar paso al tranvía se corregirá mediante el mecanismo de corrección de desfase del regulador.

Si llega un segundo tranvía, y es posible darle paso alargando la fase del tranvía, teniendo en cuenta las restricciones T_{miv} y T_{mr} , se alargará la fase del tranvía.

En caso contrario al finalizar la fase del tranvía se volverá al ciclo normal y una vez finalizado el tiempo mínimo de la fase se introducirá de nuevo la fase del tranvía para dar paso al segundo tranvía.

Micro regulación

Si un tranvía fuese capaz de seguir siempre el trayecto teórico utilizado para calcular la onda verde, no sería necesario establecer ninguna medida adicional para dar paso al tranvía en un cruce, ya que el tranvía, una vez situado dentro de la onda verde, iría encontrando verde en todos los cruces.

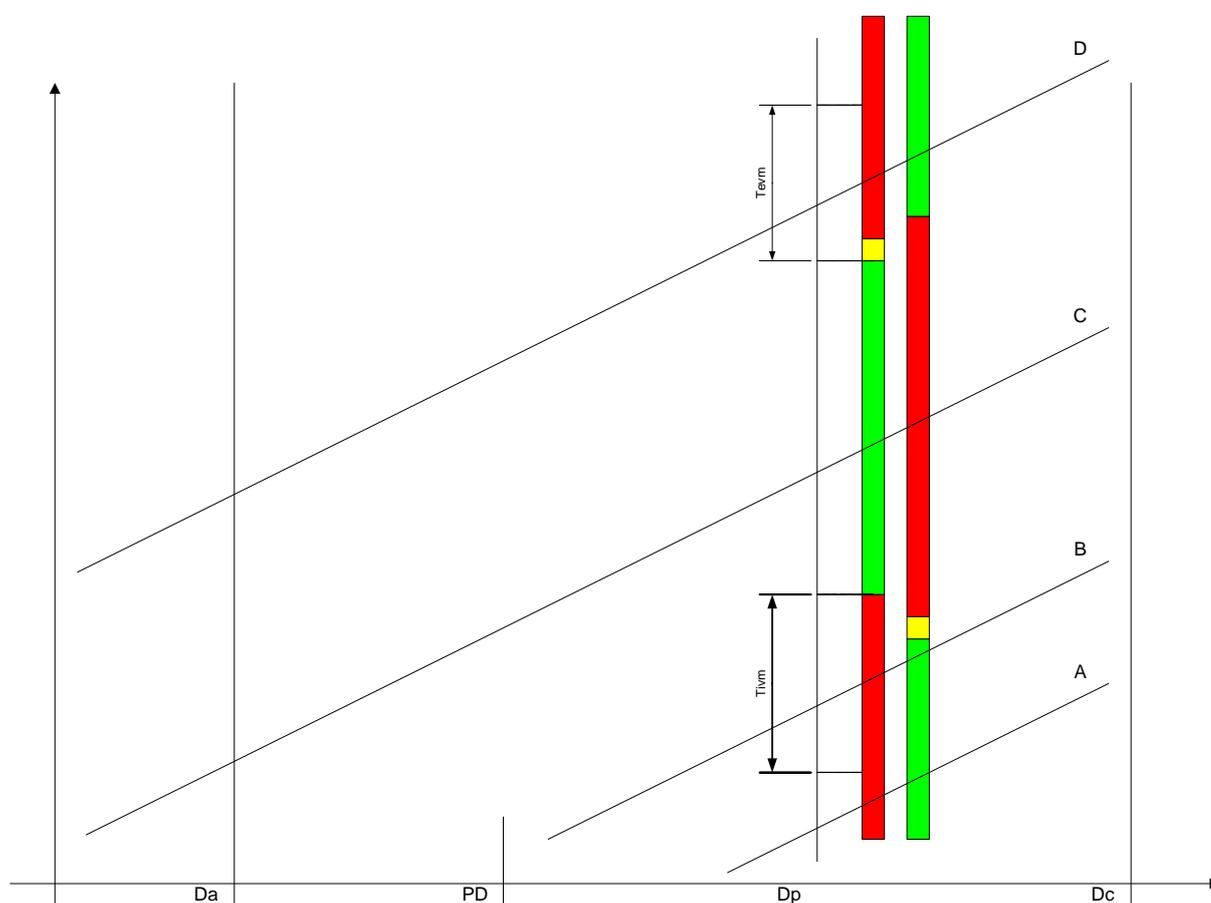
Esta estrategia permite modificar localmente la onda verde en la que circula el tranvía para adaptarla, dentro de unos márgenes, a las desviaciones del trayecto del tranvía respecto del trayecto teórico.

Se podrá tomar dos acciones: inicio de verde o extensión de verde. En las dos se modifica el instante de cambio entre dos fases, de forma que el tiempo que se alarga una de ellas se recorta de la otra, permaneciendo constante la duración conjunta.

El inicio de verde consiste en adelantar el instante de cambio a la fase del tranvía. De esta forma, se podrá dar paso a un tranvía que fuese a llegar en rojo, pero dentro del margen de inicio de verde.

La extensión de verde consiste en alargar el tiempo de la fase del tranvía a costa de la duración de la fase siguiente. De esta forma se conseguirá dar paso a un tranvía que llegara retrasado.

El inicio de verde y la extensión de verde vendrán limitados por el tiempo mínimo de la fase anterior y posterior, respectivamente, a la fase del tranvía. En algunos cruces especialmente críticos será aconsejable mantenerlos dentro de unos márgenes más estrechos, a fin de que se pueda controlar el impacto sobre el tráfico. Para ello se establecerá el margen de máximo inicio de verde (T_{ivm}) y de extensión máxima de verde (T_{evm}), que conjuntamente con T_{miv} condicionarán la el inicio o extensión de verde en cada momento.



Cuando se activa D_a se calcula la ventana de verde pedida por el tranvía ($T_{pv}+T_{lp}$ a partir de $I_{pp}-T_{pv}$). A continuación se detallan las diferentes situaciones que se pueden dar:

- El instante $I_{pp}-T_{pv}$ cae fuera de la fase del tranvía y de los márgenes de inicio de verde y extensión de verde. No es posible actuar, por lo que el tranvía deberá esperar la próxima aparición de la fase del tranvía, para la que se programará un inicio de verde máximo. Tranvía A en la figura.

La llegada del tranvía deberá ser conocida con la suficiente antelación (T_{ma}). Este tiempo debe ser superior al inicio de verde máximo más la duración de la transición de entrada a la fase del tranvía.

$$T_{ma} = T_{ivm} + T_{eft}$$

El tiempo mínimo de activación (T_{ma}) condicionará la distancia mínima a que deberá situarse el detector de aproximación. Deberá ser como mínimo la distancia que recorre el tranvía durante T_{ma} circulando a la velocidad nominal en ese tramo.

La llegada de un segundo tranvía se tratará como se ha descrito hasta aquí, teniendo en cuenta que tanto el inicio como la extensión de verde sólo podrán ampliarse, y siempre teniendo en cuenta T_{ivm} .

Las órdenes implementadas en el Regulador CD que permiten la configuración de la preferencia al tranvía son las siguientes:

PA	Orden para activar y desactivar la preferencia del tranvía
PAI	Orden para (des)activar la preferencia del tranvía en el arranque (inicialmente)
PAP	Orden para la programación los pasos de peatones (Acceso a Parada)
PAV	Orden PAV para la Definición del Tiempo de PreAviso y el Tiempo de PreVerde
PBC	Orden para definir si el buffer de registros de paso es circular o no. En caso de ser circular
PD	Orden para programar los parámetros de caracterización de los detectores del tranvía
PDI	Orden para consultar la información obtenida de los detectores de paso del tranvía
PE	Orden para definir los tiempos y porcentajes de extensión de verde de las fases (sean o no del tranvía)
PF	Orden para definir las fases de tranvía y si son específicas
PG	Orden para definir la estrategia de preferencia del tranvía
PN	Orden para definir los tiempos y porcentajes de inicio de verde de las fases (sean o no del tranvía)
PP	Orden para la programación de planes de tráfico.
PPF	Orden para consultar el estado del gestor de preferencia
PR	Orden para definir el tiempo máximo de rojo de los grupos de tráfico
PRP	Orden para definir el porcentaje del registro destinado a datos de paso

PSO	Orden para consultar y borrar el registro de paso de los tranvías
PT	Orden para programar los parámetros que define cada uno de los sentidos de circulación del
PTI	Orden para consultar y borrar el registro de tiempos de los tranvías
PTT	Orden para definir el tiempo entre tranvías

4. Fases del proyecto

El proyecto se ha desarrollado dentro de lo previsto completándose todos los hitos establecidos.

Las pruebas realizadas a los prototipos han sido satisfactorias, tanto las internas de Etra I+D como las realizadas para la instalación de Barcelona por el cliente (Alstom Transporte).

En la actualidad el sistema se encuentra instalado en Barcelona y en fase de puesta en marcha.

Como resultado de esta puesta en marcha se han solicitado una serie de ampliaciones a la funcionalidad del producto para adecuarlo a las particularidades de explotación del Ayuntamiento de Barcelona. Esta ampliación de funciones se realiza fuera de este proyecto.

5. Aplicabilidad a otros medios de transporte

Los resultados de este proyecto son reutilizables en un porcentaje muy alto para otro tipo de transporte público y servicios de emergencia, aunque en algunos casos puede requerirse una ampliación de la funcionalidad importante.

Uno de los aspectos más importantes a considerar en la gestión de la preferencia es definir el equilibrio entre la prioridad otorgada al transporte público y el perjuicio al resto del tráfico. Este equilibrio depende de muchos aspectos tales como la densidad de tráfico al que se le otorga preferencia, la densidad del resto de tráfico, la zona de la ciudad, la configuración de los cruces, las características de los vehículos públicos y las políticas aplicadas por los gestores del transporte y el tráfico. Un caso especial de equilibrio se produce cuando la preferencia al transporte público afecta a otros vehículos de transporte público.

La gestión de la preferencia para vehículos de emergencia puede ser cubierta directamente por PrefTran. En este caso se aplicaría la estrategia de prioridad máxima. Los modelos y algoritmos son plenamente reutilizables pero habría que reestudiar la parte de los medios físicos de detección. Para el caso de la preferencia al tranvía se han utilizado detectores específicos ferroviarios debido a las consideraciones de seguridad que requiere este tipo de vehículos. Aunque el detector utilizado no afecta al modelo

desarrollado, la utilización de otros tipos de detectores pueden requerir un tratamiento adicional.

Como alternativas a los detectores ferroviarios se pueden utilizar balizas infrarrojas, emisores por radiofrecuencia o incluso mediante la localización de las flotas de vehículos de emergencia mediante GPS. Para los tres casos no se requieren modificaciones en PrefTran. En el tercer caso se debe disponer de un sistema de localización de flotas con la suficiente precisión para que sea efectiva la preferencia.

La utilización de un sistema como PrefTran requiere un esfuerzo muy importante en la configuración de los distintos parámetros por parte de los explotadores del sistema por lo que su uso debe ser estudiado con mucho cuidado. Si se pretende extender el uso de la preferencia, por ejemplo para las ambulancias de una ciudad, esta justificado utilizar PrefTran, ya que los beneficios pueden ser muy importantes. Para un uso menos ambicioso, como pueda ser la salida de un parque de bomberos, existen estrategias menos eficientes pero mucho más sencillas de utilizar y de las que ya se disponía en Etra I+D con anterioridad a este proyecto.

La gestión de la preferencia para el transporte público de superficie, como son los autobuses, puede realizarse directamente con PrefTran, en este caso se pueden utilizar las dos estrategias (prioridad máxima y microrregulación).

La utilización de PrefTran en una línea de autobuses es directa y está contemplada en el modelo desarrollado. Como en el caso de los servicios de emergencia se debe seleccionar otro tipo de detector que puede requerir un tratamiento adicional.

Explotar varias líneas de autobuses con poca interacción entre ellas es perfectamente factible con PrefTran pero extender el uso de PrefTran a las líneas de autobuses de toda una ciudad requiere una ampliación muy importante de la funcionalidad de PrefTran. Esta ampliación reutilizaría casi todo lo desarrollado en PrefTran y añadirá unas funcionalidades extra.

La extensión de PrefTran a la gestión de los autobuses de una ciudad es un tema de máximo interés para Etra I+D como lo refleja que ha sido propuesta como proyecto dentro del programa Profit del 2004.

Las diferencias fundamentales entre la utilización de tranvías y autobuses son:

Tranvía	Autobús
Número de vehículos reducido en la ciudad.	Elevado número de vehículos circulando por la ciudad.
Pocas líneas de tranvías.	Muchas líneas de autobuses.
Las líneas tienen un trazado fijo y no se modifica sin modificar la infraestructura.	Las líneas de tiene un trazado fácilmente modificable y adaptable a la demanda.
Al ser pequeño el número de tranvías circulando la conflictividad con el tráfico privado es pequeña.	Al ser alto el número de autobuses circulando la conflictividad con el tráfico privado es muy grande.
No es probable que dos tranvías circulen seguidos en el acceso a un cruce.	Es frecuente que dos o mas autobuses circulen seguidos en el acceso a un cruce.
No es probable que dos o mas tranvías lleguen simultáneamente a un cruce por	Es frecuente que dos o mas autobuses lleguen simultáneamente a un cruce por

accesos antagónicos.	accesos antagónicos.
El número de cruces afectados es pequeño.	Los cruces afectados son casi todos los cruces de la ciudad.

Debido a estas diferencias se debe establecer una estrategia de preferencia que se adapte a las particularidades de los autobuses. Mejorando los siguientes aspectos:

- El sistema de detección no puede estar basado en detectores situados en la vía. Se deben utilizar técnicas que no requieran infraestructura puesto que debería ser numerosa con los costos que conlleva y debería adaptarse cada vez que se modifican las líneas.
- La preferencia semafórica debe tener más en cuenta la presencia del tráfico privado por lo que se deberá adaptar de forma dinámica a la situación del tráfico en cada instante. Esta información no solo debe considerar la situación local en un cruce si no al resto de la ciudad.
- Debe considerarse el tratamiento de varios autobuses accediendo al mismo cruce. Ya sea por el mismo acceso o por accesos antagónicos.
- El sistema resultante es mas complejo debido al aumento complejidad del tratamiento en cada uno de los cruces y al número de cruces y autobuses afectados. Este aumento de la complejidad requiere dotar a los administradores de herramientas para informarse del funcionamiento del sistema y para facilitar su gestión.

Una descripción más completa de la gestión de la preferencia aplicada a los autobuses se puede encontrar en [D4].

6. Documentación Asociada

Los siguientes documentos amplían la información expuesta en los apartados anteriores.

- [D1] DOCUMENTO DE REQUERIMIENTOS DE USUARIO. PREFERENCIA AL TRANVÍA. REGCD. ETRA I+D RegCD-I+D-01-04. Versión 8.0/1.5. enero, 2004.
- [D2] TRANVÍA DE BARCELONA. Protocolo de Pruebas FAT del Software de Prioridad.
- [D3] REGULADOR CD. PREFERENCIA AL TRANVÍA. RegCD. ETRA I+D RegCD-I+D-05-16. Versión 8.54/1.0. febrero, 2004.
- [D4] PROGRAMA PROFIT. PROYECTO: Preferencia al Autobús (PrefBus). PLAN ESTRATÉGICO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO. ETRA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO, S.A. Diciembre, 2003.

