

## Requisitos de los modelos para líneas metropolitanas y de alta velocidad



*Instituto de Investigación Tecnológica.  
Universidad Pontificia de Comillas*

*Instituto de Investigación Tecnológica.  
Metro de Madrid*

Monografías **ElecRail/8**

**Requisitos de los modelos para líneas metropolitanas y de alta velocidad**

Instituto de Investigación Tecnológica. Universidad Pontificia de Comillas

Instituto de Investigación Tecnológica. Metro de Madrid



Con la subvención del Centro de Estudios y experimentación de Obras Públicas (Ministerio de Fomento), número de proyecto PT-2007-038-20IAPM.

- © Universidad Pontificia de Comillas y Metro de Madrid
- © De esta edición, Grupo Gestor del Proyecto ElecRail, 2008

ISBN: 978-84-940054-3-5

Depósito Legal: M-12062-2012



---

# INDICE

INDICE .....	3
1. Objeto y finalidad .....	4
2. Modelos para el diseño de la conducción óptima .....	5
1.1. Requisitos operativos.....	5
1.2. Requisitos de confort de la marcha .....	7
1.3. Requisitos impuestos por el equipamiento de conducción ATO .....	7
1.4. Requisitos asociados al material móvil .....	8
1.5. Requisitos asociados a la infraestructura .....	9
1.6. Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados .....	9
3. Modelos de diseño de horarios.....	11
1.7. Requisitos operativos.....	11
1.8. Requisitos para la mejora de la eficiencia energética .....	12
1.9. Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados .....	12
2. Objeto y finalidad .....	13
3. Modelos de diseño de conducción óptima .....	14
3.1. Requisitos operativos.....	14
3.2. Requisitos de infraestructura .....	15
3.3. Requisitos de la red de alimentación .....	15
3.4. Requisitos impuestos por la conducción manual.....	16
3.5. Requisitos del modelo de simulación del tren.....	19
3.6. Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados .....	19
4. Modelos de diseño de horarios .....	21
4.1. Requisitos operativos.....	21
4.2. Requisitos comerciales.....	22
4.3. Requisitos asociados a la implantación de horarios y pruebas.....	22
4.4. Requisitos para la mejora de la eficiencia energética .....	22
4.5. Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados .....	23

## 1. OBJETO Y FINALIDAD

En este documento se especifican los requisitos de los modelos a desarrollar para la mejora de la eficiencia energética en líneas metropolitanas. Estos trabajos se realizarán dentro de la Fase 3 del proyecto ElecRail; Análisis sistemático del consumo de energía en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo de modelos y simuladores parametrizables.

Los modelos que se desarrollarán para líneas metropolitanas son:

1. Modelos para el diseño de la conducción óptima.
2. En líneas metropolitanas equipadas con sistema de conducción automática ATO por cada interestación se diseñan varias marchas ATO con distintos tiempos de recorrido que permiten recuperar retrasos o realizar marchas más lentas según las necesidades de regulación. El objetivo de los modelos para el diseño de la conducción óptima es diseñar dichas marchas no sólo atendiendo a los tiempos de recorrido objetivo y al cumplimiento de requisitos operativos y de confort, sino que además, sean las de menor consumo energético.
3. Se desarrollarán modelos basados en simulación que generarán todas las conducciones posibles, de acuerdo con las características del equipo ATO, entre cada dos estaciones y que proporcionarán las estrategias de selección de marchas óptimas.
4. Para realizar una simulación realista de la marcha del tren se deberán modelar todos los aspectos involucrados en la dinámica del tren y el cálculo de las energías de tracción y regeneración: características del material móvil, de la vía, de la red de alimentación y las características funcionales del sistema ATO.
5. Los modelos a desarrollar incorporarán como dato de entrada resultados del simulador del sistema eléctrico de alimentación, correspondiente a la fase 2 del proyecto, en concreto los coeficientes necesarios que permitan modelar el grado de aprovechamiento de la energía regenerada, la cogeneración y los acumuladores.
6. Modelos para el diseño de horarios.

El problema de reparto de tiempos de reserva en la planificación de horarios de líneas metropolitanas se concreta en la determinación de las marchas de ATO nominales (si no hay retrasos) a aplicar en cada recorrido entre estaciones. El dato de partida al modelo es el tiempo total de viaje entre estaciones cabecera, cuya diferencia con el tiempo mínimo de viaje (a marcha tendida y tiempos de parada mínimos) resulta el tiempo de reserva total a repartir en los recorridos a marcha nominal entre estaciones

Se desarrollará un modelo de optimización para el cálculo del tiempo de recorrido nominal entre estaciones. Se repartirán los tiempos de reserva de forma que se consiga el consumo mínimo, atendiendo a las restricciones técnicas y las impuestas por el operador.

Los modelos emplearán también información obtenida del modelo de simulación del sistema de alimentación que se desarrollará en la fase 2 del proyecto ElecRail para incorporar el grado de aprovechamiento de la energía regenerada en los frenados en el cómputo de consumo total, mediante sistemas de acumulación y transferencia de energía entre trenes.

---

## 2. MODELOS PARA EL DISEÑO DE LA CONDUCCIÓN ÓPTIMA

En este apartado se describen los requisitos del modelo de diseño de conducción a desarrollar en el proyecto. El resultado de este modelo es el conjunto de marchas ATO que minimizan el consumo del tren siempre respetando todo tipo de criterios y restricciones impuestos tanto por los equipamientos, como por el operador.

El modelo calculará las posibles marchas que se obtienen como combinación de todos los parámetros del equipo de ATO en estudio. De esta forma se facilitará el diseño de las marchas óptimas que cubran el trayecto entre cada dos estaciones con distintos tiempos entre ellas y el mínimo consumo de energía posible y que serán los parámetros de conducción automática ATO a cargar en los equipos embarcados. El conjunto de conducciones óptimas será utilizado por el modelo de optimización de horarios propuesto en el apartado anterior.

Para ello, se han identificado los requisitos que actualmente deben cumplir tanto el modelo de diseño de conducción óptima como la herramienta asociada:

1. **Requisitos operativos.** Necesarios para atender a la regulación del tráfico de trenes, ya sea manual o automática
2. **Requisitos de confort de la marcha.** Para obtener soluciones reales que se puedan implementar.
3. **Requisitos impuestos por el equipamiento de conducción ATO.** Referentes a las características técnicas y posibilidades que este equipamiento ofrece.
4. **Requisitos asociados al material móvil:** tracción y freno, frenado regenerativo, acumuladores embarcados, dinámica
5. **Requisitos asociados a la infraestructura:** características de la vía, de la electrificación y de los acumuladores fijos.
6. **Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados.** Relativos a la interfaz, procedimientos gráficos, tiempos de cálculo, etc.
7. A continuación se describen los distintos puntos listados arriba:

---

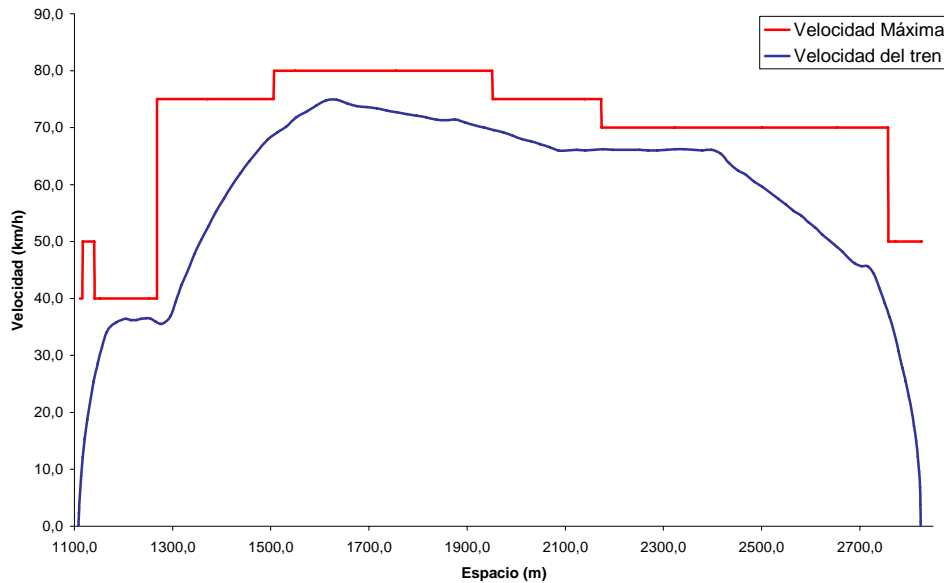
### 1.1. Requisitos operativos

Las marchas ATO objeto de diseño son utilizadas con fines de regulación, seleccionándose a la salida de cada estación una marcha concreta en función del tiempo de recorrido objetivo hasta la siguiente estación. Para cada marcha es necesario especificar unas consignas de velocidades y freno. La herramienta de optimización de marchas debe de dar como resultado estas consignas correspondientes a las conducciones diseñadas en cada interestación.

La herramienta de diseño de marchas deberá de atender a los siguientes criterios operativos para cada marcha:

- Marcha tendida, es decir, la de tiempo mínimo obtenida sin ejecutar consignas de deriva y la máxima deceleración de frenado (Figura 1). Esta marcha será seleccionada cuando los trenes lleven retraso.

Figura 1. Marcha tendida (marcha 0)



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica  
Notas: Marcha tendida en una interestación

- Otras marchas más lentas, que permitirán una circulación más lenta que la tendida. Se diferenciarán de ésta y entre ellas, en un tiempo que no podrá superar el máximo establecido y que será un criterio fijado por el operador.

La marcha nominal será elegida de entre las anteriores con el modelo de diseño de horarios del apartado siguiente. A partir de ésta y en función de la circulación del tren, adelantado o retrasado respecto al horario establecido, se seleccionará una marcha más rápida o más lenta, consiguiéndose en este caso, mayor ahorro energético. De esta forma se evitarán tiempos de espera con el tren parado en la estación, empleándose ese tiempo adicional en una marcha más lenta y más económica.

El diseño de las marchas de regulación deberá de cumplir además, los siguientes requisitos de velocidad:

- Perfil de velocidades máximas - en todo momento la marcha diseñada respetará las restricciones de velocidad máxima por seguridad (Figura 1).
- Perfil de velocidades mínimas - de forma similar, y para evitar el desgaste excesivo del carril al paso de tren por curva, se establecerán unas velocidades mínimas del tren al paso por las curvas debido al peralte.

## 1.2. Requisitos de confort de la marcha

---

Las marchas ATO objeto de diseño deberán de respetar también unos criterios relativos al confort de los viajeros. En general la sensación de molestia en la circulación del tren se relaciona con la variación de la aceleración (jerk), al que se le exige un valor entorno a  $0,6 \text{ m/s}^3$ . También se deberá controlar en el corte de tracción para el establecimiento de derivas o como transición antes del establecimiento de freno. Además, es motivo de molestia el cambio frecuente de modo de tracción, aunque cada uno de ellos individualmente respete el criterio de jerk.

Todo anterior se concretará en la herramienta de diseño en la exigencia de los siguientes requisitos a cada marcha:

- Rampa máxima admisible para cortar tracción. Solo se permitirá diseñar marchas en las que el corte de tracción por motivos de regulación se realice en valores de rampa por debajo de un valor límite, de forma que se asegure que la sacudida al cortar no resulta molesta.
- Duración mínima de cada modo de tracción. Solo serán válidas aquellas marchas en las que por decisión de diseño no se generen modos de conducción (tracción, deriva o freno) con una duración por debajo de un valor umbral.
- Número máximo de remotes. No se admitirán como válidas aquellas marchas en las que se produzcan un número de remotes (cambios deriva-remotor) por encima de un valor (configurable). Se trata de evitar aquellas marchas en las que incomoda el número total de "tirones" ejecutados en una misma interestación.
- No serán válidas aquellas marchas que tengan en algún momento una velocidad menor a la velocidad mínima establecida para todo el recorrido.

## 1.3. Requisitos impuestos por el equipamiento de conducción ATO

---

El equipamiento embarcado de conducción automática, ATO, condiciona fuertemente las distintas conducciones que se pueden ejecutar en la práctica

- Se reproducirá la lógica de funcionamiento del equipo ATO en estudio, calculándose de forma similar a la real, los puntos de detección de parada en estación, de regulación, de freno por reducción de velocidad, etc. Estos instantes determinan los cambios de modo de conducción (comienzo de regulación de velocidad o freno).
- Se tendrán en cuenta en los modelos los retardos en el funcionamiento del ATO y los márgenes de seguridad que maneja en cada función.
- Las consignas de control a diseñar utilizando el simulador serán las mismas que controlan al equipo de ATO real del tren.
- Los parámetros de configuración de la marcha ATO a calcular serán los mismos que se programan en los equipos ATO reales.

- Los valores que puede tomar cada uno de los parámetros de conducción ATO a diseñar serán valores discretos. Serán datos de partida de la herramienta de diseño el conjunto de valores posibles de cada parámetro.
- En el desarrollo del modelo se tendrán en cuenta tanto las especificaciones funcionales de los sistemas como la contrastación y ajuste con medidas reales.

---

## 1.4. Requisitos asociados al material móvil

---

El simulador del motor y de la dinámica del tren deberá de tener en cuenta los siguientes aspectos:

### Tracción y freno

- Se modelará en detalle el comportamiento del equipo de tracción a partir de las curvas teóricas de tracción y freno proporcionadas por el fabricante de los motores y contrastadas con medidas reales.
- El consumo energético se calculará en función de los distintos modos de funcionamiento del motor mediante el cálculo y modelado de distintos rendimientos dependientes de transitorios, velocidades, porcentajes de tracción, etc.
- El modelo de los motores incorporará la capacidad y características de regeneración por freno eléctrico.
- Se tendrá en cuenta el control del nivel de tracción en función de las consignas de conducción que transmita el simulador de ATO. Se incluirán también los retardos y ciclos de funcionamiento de este control.

### Acumuladores embarcados

- En el modelo se tendrá en cuenta la presencia de un acumulador de energía embarcado que permite aprovechar la energía del frenado, y los parámetros necesarios para considerar su grado real de aprovechamiento.

### Dinámica

- El simulador implementará un modelo apropiado para estimar en todo momento la resistencia al avance en función de la velocidad y posición del tren, incluyendo las resistencias propias del tren en circulación en llano (aerodinámicas, rozamientos, etc.) y las asociadas al trazado (pendientes y curvatura de la vía).
- Se ofrecerá la posibilidad de simular teniendo en cuenta las pendientes de la vía únicamente mediante sus vértices o incluyendo el detalle de las curvas de transición entre pendientes.
- Se incluirá un modelo de tren con masa distribuida a lo largo de su longitud.



## 1.5. Requisitos asociados a la infraestructura

---

### Vía

La curvatura, y sobre todo el perfil de la vía, los puntos de parada en estación y los límites de velocidad máxima, deberán ser correctamente simulados para una mayor aproximación de la simulación del movimiento del tren, a la realidad.

- El simulador ofrecerá la posibilidad de simular la dinámica del tren de dos formas diferentes: utilizando cambios de pendiente bruscos, sin acuerdos o bien, utilizando un perfil continuo de la vía con acuerdos entre pendientes.
- Los límites de velocidad máxima deberán respetarse siguiendo el mismo comportamiento que ejecuta el equipo de conducción ATO.

### Electrificación

El sistema de alimentación de los trenes incluirá todos los elementos de la red implicados en la alimentación y regeneración de energía: subestaciones, catenaria, puntos de retorno con inversores, acumuladores fijos, acumuladores embarcados, consumo de sistemas auxiliares, transferencia de energía entre trenes y a otras líneas de alimentación. De esta forma será posible evaluar la cantidad de energía regenerada que podría ser aprovechada por distintos medios.

Estos modelos tienen en cuenta los resultados obtenidos del modelo del sistema de alimentación para incorporar en los cálculos el nivel de aprovechamiento de la energía regenerada por la utilización de acumuladores, por cogeneración a la red o por transferencia a otros trenes.

Se incluirán en los cálculos de consumo, el consumo de los servicios auxiliares del tren y si se puede alimentar de la propia energía regenerada en el frenado.

---

## 1.6. Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados

---

La herramienta de diseño a desarrollar tendrá como objetivo último facilitar el diseño de las marchas de ATO más económicas con la mejor precisión posible. Para ello habrá de cumplir los siguientes requisitos:

- El usuario podrá introducir a través de una interfaz, el conjunto de valores posibles que pueden tomar los parámetros de configuración de ATO (de entre los que permite el equipamiento). Como resultado, la herramienta simulará sistemáticamente todas las conducciones factibles con los valores introducidos, evaluando para cada una de ellas:
  - Tiempo de recorrido
  - Consumo energético
  - Energía regenerada
  - Cumplimiento de cada una de las restricciones operativas y de confort

- La herramienta representará gráficamente el conjunto de conducciones simuladas en una interestación, y se implementarán los procedimientos de diseño de marchas con el objetivo de seleccionar soluciones óptimas.
- El conjunto de las marchas óptimas obtenido en cada interestación será utilizado por el modelo de optimización de horarios descrito en el apartado siguiente.
- La herramienta permitirá configurar a través del interfaz de usuario los principales datos de configuración interna de los equipos de ATO para poder particularizar y simular el comportamiento de los equipos de conducción en distintas líneas de metro.
- Se desarrollarán las herramientas de importación de datos necesarias para configurar la herramienta de diseño a partir de los ficheros de configuración de los equipos de conducción automática ATO con los que se realicen las pruebas.

## 3. MODELOS DE DISEÑO DE HORARIOS

El problema de reparto de tiempos de reserva en la planificación de horarios de líneas metropolitanas se concreta en la determinación de las marchas de ATO nominales a aplicar en cada recorrido entre estaciones. La diferencia entre el tiempo total de viaje entre estaciones cabecera y el tiempo mínimo de viaje (a marcha tendida y tiempos de parada mínimos) es el tiempo de reserva total a repartir en los recorridos a marcha nominal entre estaciones. El reparto óptimo de estos tiempos de reserva a lo largo del recorrido constituye el objetivo del modelo de diseño de horarios a desarrollar.

El resultado de estos modelos es un horario que minimice el consumo en la línea, siempre respetando las restricciones operativas impuestas. Para ello el modelo se diseñará atendiendo a distintos requisitos:

- Requisitos operativos.
- Requisitos para la mejora de la eficiencia energética.
- Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados.

A continuación se describe cada uno de ellos:

---

### 1.7. Requisitos operativos

Desde el punto de vista operativo, los horarios resultantes de la aplicación de estos modelos deben cumplir los distintos tiempos asociados a la marcha del tren: tiempo total de viaje entre cabeceras, los tiempos de parada máximos y mínimos en cada estación y el tiempo de recorrido entre estaciones.

- Tiempo total de viaje entre cabeceras: Se deberá respetar el tiempo nominal de viaje entre estaciones cabeceras (acotando la variación de dicho tiempo de viaje al valor que se especifique).
- Tiempos de recorrido entre estaciones: El tiempo entre la salida de una estación y la llegada a la siguiente estará acotado entre el tiempo mínimo correspondiente a marcha tendida y el tiempo máximo correspondiente a la marcha tendida más un tiempo máximo.
- Tiempos de parada en estación: Deberán estar acotados entre un tiempo mínimo necesario para carga y descarga de viajeros y el tiempo de parada máximo por criterios de confort.
- Sincronización, en determinadas estaciones de correspondencia, de los horarios de salida para facilitar la correspondencia a los usuarios. Por esta razón será necesario imponer restricciones en el reparto de colchones para cumplir con la hora fijada de salida en una estación de correspondencia.

En cuanto al horario comercial, la herramienta permitirá dos posibilidades

- Generar un horario de pruebas que respete el publicado con margen máximo de retraso, nunca adelanto. La herramienta proporcionará un horario técnico de circulación de trenes con precisión de segundos, que

será redondeado a su minuto inferior para su publicación. De esta forma se garantiza que los trenes no salen antes de la hora publicada.

- Generar un nuevo horario independiente del publicado que maximice el ahorro aunque para ello sea necesario cambiar el horario actual.

---

## 1.8. Requisitos para la mejora de la eficiencia energética

---

El modelo de optimización de horario a desarrollar tomará como dato de partida el conjunto de conducciones posibles en cada recorrido entre estaciones, que proporciona el consumo mínimo para cada tiempo de recorrido. Este conjunto de conducciones se generará con la herramienta de diseño de marchas del apartado anterior.

Los datos de partida ya incorporarán el grado de aprovechamiento de la energía regenerada en los frenados en el cómputo de consumo total.

El horario solución deberá de distribuir el margen total de tiempo disponible de cabecera a cabecera de línea en cada uno de los recorridos, de manera que se minimice el consumo total de energía, y respetando los criterios operativos definidos.

---

## 1.9. Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados

---

Como herramienta de diseño asistido, el modelo de optimización de horarios permitirá al diseñador, desde un interfaz de usuario, introducir los datos necesarios para ejecutar el modelo:

- Parámetros operativos: tiempo de viaje, tiempos de recorrido y tiempos de parada.
- Parámetros de configuración de la optimización.
- Límites en las variables de búsqueda: tiempos máximos y mínimos de parada y recorrido, tiempo mínimo y máximo de viaje.
- Control del modelo de optimización: tiempo máximo de ejecución, para limitar el tiempo en el que la herramienta debe entregar una solución.

Una vez que el modelo ha completado su ejecución, o ha llegado a su limitación de tiempo de cálculo, el interfaz de usuario mostrará información de las marchas nominales propuestas para su valoración y análisis:

- Consumo total del recorrido a marcha nominal comparado con el consumo actual, sin considerar la energía regenerada.
- Consumo total del recorrido a marcha nominal comparado con el consumo actual descontando la energía regenerada en ambos casos.

## 2. OBJETO Y FINALIDAD

En este documento se especifican los requisitos de los modelos a desarrollar para la mejora de la eficiencia energética en la operación de líneas de alta velocidad, mediante el diseño de conducciones económicas y horarios que optimicen el reparto de márgenes de tiempo en el recorrido, teniendo en cuenta criterios de eficiencia, operativos y comerciales. Estos trabajos se realizarán dentro de la Fase 3 del proyecto ElecRail; Análisis sistemático del consumo de energía en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo de modelos y simuladores parametrizables.

Los modelos que se desarrollarán para líneas de alta velocidad son:

### 1. Modelos para el diseño de la conducción óptima.

El objetivo de estos modelos es el diseño de la conducción manual en un trayecto que verifique las restricciones operativas impuestas (tiempo de recorrido, velocidades límite, etc) y minimice el consumo energético. El resultado de la aplicación de estos modelos será una lista de consignas que deberá ejecutar el maquinista a lo largo del recorrido.

Estos modelos estarán basados en simulación, y deberán tener en cuenta, de forma detallada, las características propias de la vía, de la electrificación y del material, con el fin de obtener resultados realistas y aplicables posteriormente en el tramo de pruebas.

### 2. Modelos para el diseño de horarios.

Estos modelos se centrarán en el cálculo de horarios comerciales; a partir de la marcha mínima se repartirán los colchones de tiempo adicionales para recuperación de retrasos, atendiendo tanto a requisitos de eficiencia energética como operativos y de puntualidad.

Los modelos emplearán información obtenida en el modelo de simulación del sistema de alimentación que se desarrollará en la fase 2 del proyecto ElecRail. Esta información se aplicará a los modelos que describe este documento como, por ejemplo, parámetros que determinan el porcentaje de aprovechamiento de la energía que regenera el tren durante el proceso de frenado.

Se puede distinguir entre aprovechamiento por parte de otros trenes que se encuentren circulando en el mismo tramo de alimentación, aprovechamiento de la energía mediante la utilización de acumuladores (fijos o embarcados) y cogeneración a la red.

## 3. MODELOS DE DISEÑO DE CONDUCCIÓN ÓPTIMA

Dado un trayecto entre dos paradas y un tiempo en el que se debe finalizar dicho trayecto, se trata de analizar mediante un simulador las múltiples formas que tiene el maquinista de cubrir dicha distancia en el tiempo indicado, y de todas ellas, determinar la conducción con el mínimo consumo de energía.

Para ello, los requisitos que deberán cumplir tanto del modelo de diseño de conducción óptima como la herramienta asociada, se pueden agrupar en los siguientes bloques:

- Requisitos operativos
- Requisitos de infraestructura
- Requisitos de la red de alimentación
- Requisitos impuestos por la conducción manual
- Requisitos del modelo de simulación del tren
- Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados

A continuación se describen los requisitos asociados a cada bloque:

---

### 3.1. Requisitos operativos

El tren debe cumplir el tiempo de recorrido que marca el horario comercial. Dicho horario comercial es un horario generado según criterios ADIF. El procedimiento para obtenerlo es partir de la marcha mínima, es decir, el horario que generaría el tren si circulase todo el recorrido a la máxima velocidad que le permitiera su motor y la vía. Una vez obtenida la marcha mínima, se añaden márgenes de tiempo o colchones en los diferentes puntos de control del trayecto. Dichos márgenes de tiempo suelen consistir en redondear al medio minuto superior en el caso de puntos de control sin parada, y al minuto para puntos de control con parada. Al horario así obtenido se le añade algún margen de tiempo adicional allí donde se considere oportuno para que, finalmente, el horario comercial así obtenido tenga un margen total de tiempo añadido que se encuentre dentro de los márgenes propuestos por la UIC.

La conducción diseñada debe cumplir el perfil de velocidades máximas y no tener velocidades menores que un determinado valor (excepto en llegada a estación) con el fin de garantizar el confort del viajero.

El porcentaje de aprovechamiento de energía regenerada por otros trenes depende de aspectos relacionados con la operación, como la frecuencia de paso de los trenes, así como de aspectos relacionados con la infraestructura.

## 3.2. Requisitos de infraestructura

---

Cada vía tiene unas características únicas que deberá tener en cuenta el simulador para realizar los cálculos. Las diferentes características que tendrá en cuenta el simulador son las siguientes:

- Perfil: se determinarán los diferentes valores de pendiente o rampa de la vía a lo largo de su recorrido. Se modelarán también las transiciones entre pendientes mediante curvas parabólicas definidas con su parámetro "Kv".
- Planta: se definirá el recorrido en planta distinguiendo en tramos de recta, curva o clotoide, especificando el radio para el caso de curva, y el parámetro para el caso de clotoide.
- Túneles: se definirá la posición de inicio y fin de cada túnel del recorrido, y su factor asociado.
- Límites de velocidad permanentes: se trata de límites de velocidad que no pueden ser rebasados, bien por características de diseño de la vía, o bien por proximidad a núcleos urbanos.
- Límites de velocidad temporales: son límites de velocidad que se definen de manera provisional y se añaden a los ya existentes límites permanentes. Tienen carácter temporal, y se usan, por ejemplo, cuando se realizan obras en las inmediaciones de un tramo de vías.
- Anchos de vía: se especificará si el ancho de vía es el UIC (1.435 mm) o el ibérico (1.668 mm), así como la localización de estaciones de cambio de ancho.

---

## 3.3. Requisitos de la red de alimentación

---

Dentro de los requisitos de alimentación, el simulador admitirá la definición de los siguientes aspectos:

- Tramos de alimentación: son aquellos en los que el tren puede consumir energía eléctrica.
- Zonas neutras: son tramos en los que el tren forzosamente circulará en deriva por no tener alimentación.
- Posición y característica de acumuladores de energía
- Puntos de cogeneración a la red
- Porcentaje de aprovechamiento de la energía regenerada por uso de acumuladores de energía y por cogeneración a la red.

Este parámetro se obtendrá a través de la ejecución de los modelos de simulación del sistema de alimentación.

## 3.4. Requisitos impuestos por la conducción manual

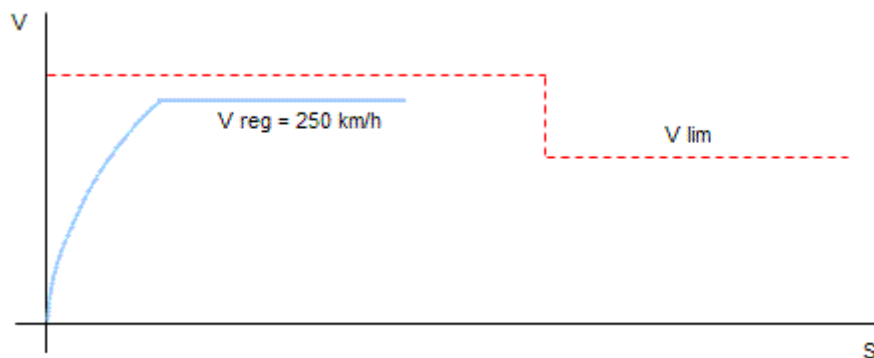
La marcha final, que se diseñará con el fin de garantizar el mínimo consumo energético entre dos paradas consecutivas, tendrá el formato de una lista de consignas a ejecutar por el maquinista, consignas de diferentes tipos que se describen a continuación.

### Tipos de consignas

#### Regulación de velocidad desde - hasta

Consiste en mantener una velocidad de regulación constante a lo largo de un trayecto determinado por sus puntos kilométricos inicial y final. Esta velocidad se podrá mantener siempre que las características de la vía (pendiente/rampa), del motor y del equipo de frenado lo permitan. Una vez el tren alcanza la velocidad de regulación, deberá traccionar ante una rampa para no perder velocidad, y es posible que tenga que frenar ante una pendiente para no ganarla. Un ejemplo de este tipo de conducción se puede ver en la gráfica espacio-velocidad de la figura 1, en la que un tren cubre el trayecto Estación Inicio-Estación Fin regulando su velocidad a 250 km/h. Una vez el tren alcanza la velocidad de regulación, sólo disminuirá en caso de que cambie la consigna de regulación a una velocidad menor, que el tren se encuentre con una limitación de velocidad inferior, o que las características del motor de tracción imposibiliten mantener dicha velocidad ante determinados valores de pendiente.

Figura 3. Gráfica espacio-velocidad con consigna de regulación



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

#### Regulación de velocidad sin frenar desde - hasta

Consiste, como la consigna anterior, en mantener una velocidad de regulación constante, con la diferencia de que si esta velocidad es menor que la velocidad máxima de la vía, se permite al tren aumentar su velocidad sin aplicar el freno (en el anterior tipo de consigna sí era necesario aplicar el freno), hasta el momento en el que el tren alcance la velocidad máxima de la vía, velocidad que no podrá ser rebasada. En cambio, el tren no bajará de la velocidad de regulación, siempre que las características de la vía (pendiente/rampa) y del motor lo permitan.

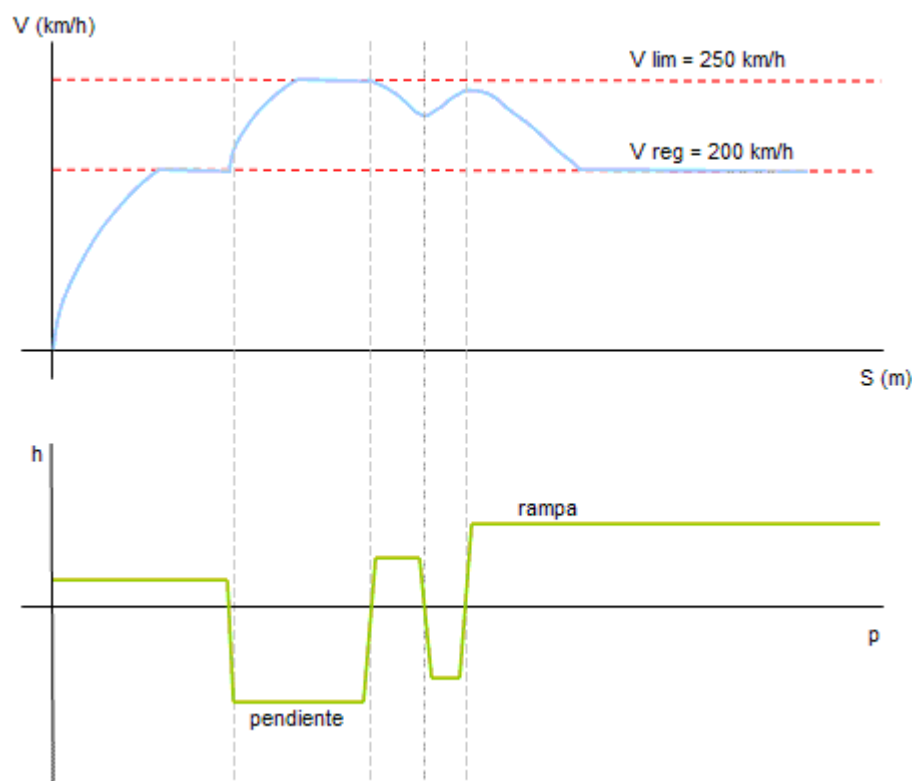
Un ejemplo de conducción que atiende a este tipo de consignas puede verse en la figura 2, en la que se ha establecido una consigna de regulación a 200 km/h sin frenar, en una vía con una velocidad máxima de 250 km/h, de tal forma que el tren mantiene en la medida de lo posible los 200 km/h.



En general, en un tramo donde la pendiente tiene el valor suficiente para que el tren aumente su velocidad si no se aplica el freno, se le permite derivar, bien hasta que la velocidad regrese de nuevo a la velocidad de regulación por la existencia de una rampa contigua que haga que el tren pierda velocidad, o bien hasta que su velocidad llegue a la máxima de la vía, momento en el que el tren aplicará el freno para no rebasarla.

Ambos casos pueden observarse en la figura 2 donde, inicialmente, el tren corta tracción y empieza a aumentar la velocidad debido a la fuerte pendiente que está atravesando. La velocidad aumenta hasta que llega al límite de la vía, donde ya no es admisible un mayor aumento de la velocidad y el tren frena lo suficiente para mantenerse a 250 km/h. Al cabo de un cierto tiempo la velocidad empieza a decrecer por la existencia de una rampa, pero posteriormente llega otra pendiente y la velocidad del tren comienza a aumentar. Esta pendiente no dura lo suficiente para que el tren alcance la velocidad límite de la vía, sino que llega una rampa que hace al tren ir perdiendo velocidad hasta que iguala a la velocidad de regulación, momento en el que el tren comienza de nuevo a traccionar para mantener dicha velocidad.

Figura 4. Gráfica espacio-velocidad con consigna de regulación sin frenar, y gráfica de pendientes asociada.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

#### Cortar tracción desde un punto kilométrico

También llamado derivar, consiste en quitar la tracción del tren, de tal forma que avance por su propia inercia, de manera que éste disminuirá su velocidad en rampa, y podrá llegar a aumentarla en pendiente, dependiendo de su velocidad y masa.

#### Traccionar desde un punto kilométrico

Es una consigna complementaria a la anterior, de manera que cuando termina una consigna de deriva, forzosamente empieza una de tracción (salvo que esté ante una

reducción o una parada en estación). Un ciclo que combine un tramo de deriva con uno de tracción se denomina ciclo deriva-remotor.

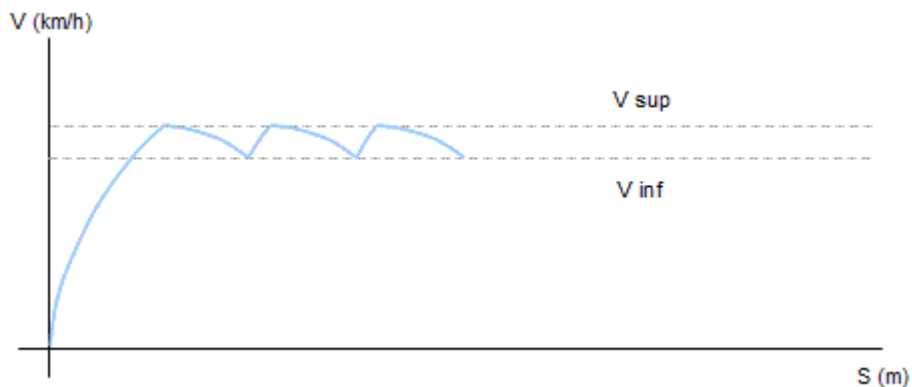
#### Frenar desde un punto kilométrico

Esta consigna consiste en aplicar el freno desde el punto kilométrico indicado hasta que varíe la consigna, o hasta que se detenga el tren. Se puede aplicar para respetar una reducción de límite de velocidad o bien para detenerse en estación.

#### Hacer ciclos deriva-remotor entre dos valores de velocidad

Consiste en realizar ciclos estableciendo dos velocidades de consigna, una superior, y otra inferior, de manera el tren tracciona hasta llegar a la consigna de velocidad superior, momento en el que comienza a derivar, decreciendo su velocidad hasta que llega a la consigna de velocidad inferior, donde vuelve a traccionar, y así sucesivamente, como puede observarse en la figura 3.

Figura 5. Ciclos deriva-remotor entre dos velocidades fijadas



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

#### Modelado de la conducción manual

Una vez descritos los tipos de consigna de conducción que puede ejecutar el maquinista, es necesario modelar la forma en que se ejecuta la conducción manual.

Es preciso caracterizar la conducción mediante parámetros que definen distancias de seguridad, margen de velocidad respecto a la velocidad límite, tiempos de retardo en la aplicación de la consigna, etc.

Para ello se analizará en detalle la conducción manual en los siguientes casos:

- Modelo de frenado ante una reducción de velocidad
- Modelo de frenado ante parada en estación
- Modelo de regulación de velocidad a velocidad máxima de la línea o a una velocidad inferior
- Modelo de regulación de velocidad sin frenado
- Modelo de ciclos deriva-remotor
- Modelo de aplicación de consigna de deriva o de consigna de tracción o de freno

Además, será necesario modelar las restricciones que impone la conducción manual en cuanto a número máximo de cambios de consigna en un trayecto (según tiempo o distancia), duración mínima de una consigna, etc.

## 3.5. Requisitos del modelo de simulación del tren

---

El simulador de la dinámica del tren tendrá en cuenta los siguientes aspectos relacionados con el tren:

1. Capacidad y rendimiento del equipo de tracción
2. Se modelará en detalle el comportamiento del equipo de tracción, y en concreto sus esfuerzos máximos en función de la velocidad.
3. Curva de frenado eléctrico en función de la velocidad
4. Consumo energético
5. El modelo tendrá en cuenta la curva de intensidad máxima. Además, se modelará el consumo energético en función de los distintos modos de funcionamiento del motor mediante el modelado de los rendimientos. En el modelo de consumo se tendrá en cuenta la existencia o ausencia de acumuladores de energía embarcados.
6. Consumo de los equipos auxiliares
7. Se incluirá un parámetro que indique si el tren puede alimentarse a través del frenado regenerativo.
8. Resistencias al avance
9. El simulador implementará un modelo apropiado para calcular en todo momento la resistencia al avance en función de la velocidad y posición del tren, incluyendo las resistencias propias del tren circulando en llano (aerodinámicas, rozamientos, etc) y las asociadas al trazado (pendientes y curvatura de la vía).
10. Masa y longitud
11. Se modelará el tren como una masa distribuida uniformemente a lo largo de su longitud.

## 3.6. Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados

---

La herramienta de diseño deberá contemplar en su proceso de simulación y búsqueda de solución, distintas formas de conducción para un itinerario y conjunto de paradas específico.

En primer lugar, la herramienta simulará la marcha mínima. Posteriormente, generará la marcha comercial según el actual criterio del ADIF explicado anteriormente.

Se simularán distintas conducciones y se obtendrá un conjunto de marchas caracterizadas por:

1. Tiempo de recorrido
2. Consumo energético
3. Energía regenerada (suponiendo que puede ser absorbida por la misma)
4. Cumplimiento de cada una de las restricciones operativas

De entre las conducciones que cumplan el tiempo de recorrido, se seleccionará la de menor consumo energético.

Se comparará el resultado obtenido de la optimización con la marcha tendida o marcha mínima, que es el caso correspondiente a acumular todo el colchón a la llegada a la estación.

Se comparará con otras formas de conducción (por ejemplo, con regular velocidad todo el trayecto).

Se determinará el efecto de los porcentajes de aprovechamiento de la energía regenerada.

La herramienta permitirá ajustar los parámetros que definen la conducción manual, como número máximo de consignas en un recorrido, tiempo mínimo entre cambio de consignas, etc.

---

## 4. MODELOS DE DISEÑO DE HORARIOS

El objetivo es generar horarios comerciales óptimos en consumo y compatibles con el procedimiento que emplea actualmente el ADIF y con los requisitos operativos impuestos.

Dado un tiempo origen-destino fijo con posibles paradas intermedias, se optimizará el reparto de colchones a lo largo del recorrido.

En un primer paso, el reparto se realiza en trayectos con parada. Posteriormente los modelos se ajustarán para poder realizar el reparto en trayectos limitados por puntos de velocidad no nula.

Además, en el diseño de horarios se tendrá en cuenta un modelo de retrasos, de forma que el horario obtenido sea un equilibrio entre el óptimo desde el punto de vista energético, y que además garantice un nivel de puntualidad del servicio.

Los requisitos de estos modelos se pueden clasificar en:

1. Requisitos operativos
2. Requisitos comerciales
3. Requisitos asociados a la implantación de horarios y pruebas
4. Requisitos para la mejora de la eficiencia energética
5. Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados

A continuación se describen cada uno de ellos:

---

### 4.1. Requisitos operativos

Se deberá cumplir el horario publicado, tanto en hora de llegada como en hora de salida.

Además, se considerará un horario técnico para permitir diseñar marchas que lleguen antes del horario publicado y tener una mayor garantía de cumplimiento.

Desde el punto de vista operativo, los requisitos que debe de cumplir el horario se traducen fundamentalmente en asegurar un cumplimiento adecuado de los distintos tiempos asociados a la marcha del tren:

- Tiempos de recorrido entre estaciones: el tiempo entre la salida de una estación y la llegada a la siguiente está acotado entre el tiempo mínimo, correspondiente a la suma entre la marcha tendida y el colchón mínimo, y el tiempo máximo, correspondiente a la suma de la marcha tendida y el colchón máximo.
- Tiempos de parada comercial: los tiempos de parada en estación deben estar acotados entre un tiempo mínimo necesario para carga y descarga de viajeros más el tiempo mínimo de colchón por parada comercial, y un tiempo de parada máximo, que es el mínimo técnico más el máximo tiempo de colchón. El dimensionamiento de este tiempo es precisamente uno de los parámetros fundamentales de ajuste del modelo, ya que su incremento aumenta la flexibilidad en la búsqueda de soluciones.

- Frecuencia de salida de trenes en estaciones origen: el porcentaje de aprovechamiento de energía por otros trenes depende entre otros factores de la frecuencia entre trenes.

---

## 4.2. Requisitos comerciales

---

El modelo de generación de horarios debe de contemplar los siguientes requisitos comerciales:

- Precisión del horario publicado: el horario publicado al usuario tiene una precisión de un minuto, y el compromiso de puntualidad se concreta en que la salida del tren se debe producir durante el minuto publicado. Por ejemplo, si el horario publicado es 22.05 la salida debe producirse entre las 22.05.00 y las 22.05.59. El modelo de generación de horarios debe proporcionar un horario técnico de circulación de trenes con precisión de segundos, que es redondeado a su minuto inferior para su publicación. De esta forma se garantiza que los trenes no salen antes de la hora publicada.
- Modelo de retrasos: la herramienta de diseño incluirá un modelo de retrasos, para lo cual se tendrá en cuenta la frecuencia, el valor medio y la localización de los mismos, con el objetivo de diseñar horarios que garanticen el nivel de puntualidad deseado.

---

## 4.3. Requisitos asociados a la implantación de horarios y pruebas

---

Si se pretende diseñar un nuevo horario comercial, el modelo propondrá un reparto óptimo de los márgenes de tiempo a lo largo del recorrido y por tanto un horario comercial asociado.

Por otro lado, si se parte de un horario comercial publicado que no se desea modificar, el modelo debe ser capaz de modificar la forma en que se reparten los márgenes de tiempo entre paradas, pero respetando los tiempos publicados.

---

## 4.4. Requisitos para la mejora de la eficiencia energética

---

El modelo de diseño de horarios tendrá en cuenta la localización y características de acumuladores de energía (fijos o embarcados) y de cogeneración a la red.

Usará las marchas simuladas por el modelo de generación de conducción óptima.

Se modelará un porcentaje de aprovechamiento del frenado regenerativo por otros trenes, por acumuladores o por cogeneración. Esta información se obtendrá del modelo de simulación de la red de alimentación de la fase 2.

## 4.5. Requisitos como herramienta de diseño asistido y análisis de resultados

---

Como herramienta de diseño asistido, el modelo de optimización de horarios sincronizados permitirá al diseñador, desde un interfaz de usuario, introducir los datos necesarios para ejecutar el modelo:

1. Parametrización de la infraestructura
2. Comprende estaciones, túneles, tramos de alimentación, zonas neutras, pendientes, curvas, etc.
3. Parámetros operativos
4. Incluye tiempos de recorrido y tiempos de parada.
5. Límites en las variables de búsqueda
6. Tiempos máximos y mínimos de colchón en parada y recorrido, tiempo mínimo de viaje.
7. Factores de aprovechamiento de energía regenerada
8. Horario actual/referencia obtenido con el método de Adif
9. Control del modelo de optimización
10. Tiempo máximo de ejecución, para limitar el tiempo en el que la herramienta debe entregar una solución.

Una vez que el modelo ha completado su ejecución, o ha llegado a su limitación de tiempo de cálculo, el interfaz de usuario mostrará el nuevo horario y dará información para su valoración y análisis:

11. Consumo en tracción comparado con horario actual/referencia, sin considerar la energía regenerada.

Consumo comparado con el horario actual/referencia, considerando un porcentaje de aprovechamiento de energía regenerada por otros trenes, a través acumuladores o por cogeneración a la red.





## Publicaciones del Proyecto [ElecRail](#)

### Monografías:

Monografía 1: *“Cuantificación del consumo de energía eléctrica del ferrocarril español”*: Alberto García Álvarez, M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 2: *“Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica”*: Francisco Javier Olea.

Monografía 3: *“Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria”*: José Conrado Martínez Acevedo, Carlos Tovagas Guerra, Jorge Iglesias Díaz.

Monografía 4: *“Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes”*: Pedro Estévez Irizar, Maider Varela Cuadrado, Egoitz Iturritxa Zubiri.

Monografía 5: *“Metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones en el diseño del material rodante para su reducción”*: Alberto García Álvarez, M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 6: *“Diseño de los vehículos ferroviarias para la mejora de su eficiencia energética”*: Alberto García Álvarez, M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 7: *“Alimentación eléctrica, cogeneración, almacenamiento y diseño de la red”*: Ramón R. Pecharromán, Eduardo Pilo, Álvaro López.

Monografía 8: *“Requisitos de los modelos para líneas metropolitanas y de alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas, Instituto de Investigación Tecnológica de Metro de Madrid.

Monografía 9: *“Diseño de los modelos de simulación en líneas metropolitanas”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 10: *“Diseño de los modelos de simulación en alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 11: *“Resultados de conducciones eficientes en alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 12: *“Implementación, resultados y pruebas de los modelos para líneas metropolitanas”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 13: *“Análisis sistemático del consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo y contraste de modelos y simuladores parametrizables (ELECRAIL)”*: Alberto García Álvarez, M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares.