

Diseño de los modelos de simulación en líneas metropolitanas



*Instituto de Investigación
Tecnológica.*

Universidad Pontificia de Comillas

Monografías **ElecRail** /9

Diseño de los modelos de simulación en líneas metropolitanas

Instituto de Investigación Tecnológica. Universidad Pontificia de Comillas



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

© Instituto de Investigación Tecnológica. Universidad Pontificia de Comillas

© De esta edición, Grupo Gestor del Proyecto ElecRail, 2010

ISBN: 978-84-940054-5-9

Depósito Legal: M-12064-2012



ÍNDICE

ÍNDICE	3
1. OBJETIVO Y FINALIDAD	4
1.1. Modelos para el diseño de la conducción óptima	4
1.2. Modelos para el diseño de horarios	4
2. MODELOS DE DISEÑO DE CONDUCCIÓN ÓPTIMA	6
2.1. Datos de entrada y salida	6
2.1.1 Datos de la vía	6
2.1.2 Datos del tren	8
2.1.3 Datos de ATO	10
2.1.4 Restricciones de confort	11
2.1.5 Resultados	11
2.2. Diseño modular del simulador	12
2.2.1 Módulo del ATO	13
2.2.2 Tren reduciendo velocidad ante disminución de velocidad máxima	15
2.3. Procedimiento de diseño	20
3. MODELO DE DISEÑO DE HORARIOS	24
3.1. Modelo matemático de reparto óptimo de colchones en tramos	24
3.2. Datos de entrada del modelo	27
3.3. Salida del modelo	28
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	29

1. OBJETIVO Y FINALIDAD

En este documento se especifican las características del diseño de los modelos a desarrollar para la mejora de la eficiencia energética en líneas metropolitanas. Estos trabajos se realizarán dentro 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 cumplirán funciones bien diferenciadas; el diseño de la conducción óptima y el diseño de horarios.

1.1. Modelos para el diseño de la conducción óptima

En líneas metropolitanas equipadas con sistema de conducción automática ATO, por cada interestación se diseñan varias marchas de regulación con distintos tiempos de recorrido cada una, de manera que permitan recuperar retrasos o realizar conducciones más lentas según las necesidades de regulación en cada momento. 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.

Se desarrollarán modelos basados en simulación que generarán todas las conducciones posibles entre cada dos estaciones de acuerdo con las características del equipo ATO, y que proporcionarán las estrategias de selección de marchas óptimas.

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.

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.

1.2. Modelos para el diseño de horarios

El objetivo de estos modelos es el diseño de la marcha nominal de toda la línea que permita una conducción económica con un tiempo de reserva tal que facilite la recuperación de retrasos en el caso de que haya alguna incidencia en el recorrido. El punto de partida para su elaboración será la *marcha mínima o tendida*, es decir, el mínimo tiempo en el que un determinado tren es capaz de cubrir la distancia entre dos estaciones respetando todas las restricciones relacionadas con el problema (motor, velocidades máximas, etc.), y con sus porcentajes de tracción y freno máximos, es decir, acelerando y frenando lo más rápido que le sea posible. También

habrá que conocer el tiempo total de viaje entre estaciones cabecera, cuya diferencia con el tiempo mínimo resultará en el tiempo de reserva total a repartir en los recorridos a marcha nominal entre estaciones. Para la adición de los colchones de tiempo en cada interestación, habrá que atender también a requisitos de eficiencia energética.

Los modelos emplearán información obtenida del sistema de alimentación modelados en la fase 2 del proyecto ElecRail. Por ejemplo, los parámetros que determinan el porcentaje de aprovechamiento de la energía que regenera el tren durante el proceso de frenado se extraerán de dicho modelo.

2. MODELOS DE DISEÑO DE CONDUCCIÓN ÓPTIMA

Se realizará un estudio del estado del arte en relación a los modelos de conducción automática en trenes metropolitanos, profundizando en aquellos destinados a la conducción eficiente.

El modelo a desarrollar 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. Las marchas resultado deberán respetar siempre todo tipo de criterios y restricciones impuestos tanto por los equipamientos, como por el operador.

2.1. Datos de entrada y salida.

El modelo de simulación se servirá de los siguientes datos de entrada para poder realizar los cálculos:

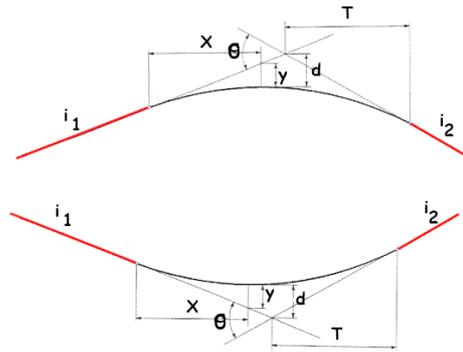
2.1.1 Datos de la vía

Caracterizarán la vía de la línea en estudio. Son los siguientes:

- **Estaciones:** Se incluirá una lista con los nombres y puntos kilométricos del centro de cada una de las estaciones de la línea.
- **Pendientes de ATO:** El perfil de vía grabado en la memoria del ATO se introducirán en una lista con los valores de pendientes en mm/m y los puntos kilométricos de cambio de pendiente.
- **Curvas:** Se especificará el radio de las curvas de la vía y el punto kilométrico de cambio.
- **Velocidades máximas:** Se trata de límites de velocidad que no pueden ser rebasados. Al igual que en los casos anteriores se definen como una lista con los valores de velocidad máxima y los puntos kilométricos donde existe un cambio en dicha velocidad.
- **Velocidades mínimas:** Se listarán también las velocidades mínimas de paso por curva para evitar el desgaste excesivo del carril debido al peralte. Como en casos anteriores junto a los valores de velocidad se especifican los puntos kilométricos en los que hay un cambio de valor.
- **Cotas:** En el caso de conocer el perfil del terreno de manera continua con los valores de cota en cada punto kilométrico discretizado se podrán introducir también a modo de lista.
- **Perfil:** Además de los valores discretos de pendientes utilizados por el equipo de ATO para sus cálculos, se determinarán también los diferentes valores de pendiente o rampa medidos en la vía modelando las transiciones entre ellas

mediante curvas parabólicas definidas con su parámetro "Kv". En general, la función utilizada para definir la curva de transición entre dos pendientes se puede aproximar por una curva parabólica modelada con la ecuación $x^2/(2 \cdot Kv)$. El parámetro Kv se puede aproximar por L/θ , siendo L la longitud de la curva de transición, y θ el valor absoluto de la diferencia entre las dos pendientes en los extremos (i_1, i_2 , Figura 1).

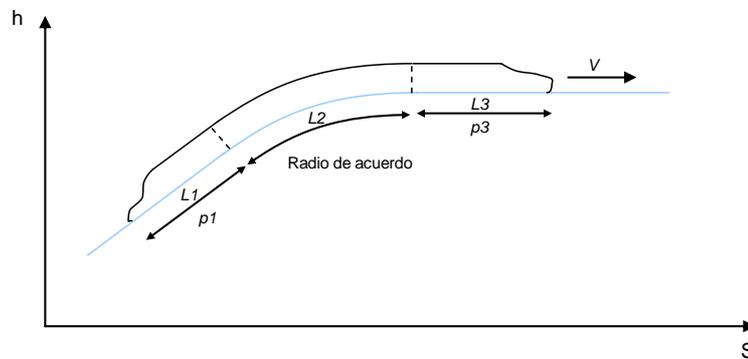
Figura 1. Transiciones entre pendientes



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

La información a introducir deberá ser el valor de cada pendiente, su "Kv", el punto kilométrico de cambio, y los puntos kilométricos de comienzo y fin de la parábola de transición. Si la información de los "Kv" no está disponible, el algoritmo de cálculo considerará las transiciones como vértices.

Figura 2. Consideración de la pendiente media.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Para el cálculo de la pendiente, se tomará un valor medio del tramo sobre el cual esté el tren en cada momento. En el caso más complejo, el tren se encontrará sobre tres tramos diferentes, ver Figura 2. El primero y el tercero serán de pendiente constante p_1 y p_3 , de longitudes L_1 y L_3 respectivamente, y el intermedio de pendiente variable de longitud L_2 , y que forma el tramo de acuerdo entre las dos pendientes adyacentes.

Según la Figura 2, la pendiente media p_m se calculará mediante la siguiente expresión:

$$p_m = \frac{L_1 \cdot p_1 + \sum_{i=0}^{L_2} L_i \cdot p_i + L_3 \cdot p_3}{L_1 + L_2 + L_3},$$

siendo el término de la sumatoria la contribución a la pendiente media del tramo de radio de acuerdo de longitud L_2 , que como se observa se aproximará mediante la

suma de subtramos de pendiente constante y longitud tan pequeña como se quiera. Para el propósito de este simulador, dichos tramos serán de longitud $L_i = 1\text{m}$, de tal forma que la expresión anterior queda de la siguiente manera:

$$p_m = \frac{L_1 \cdot p_1 + L_2 \cdot \sum_{i=0}^{L_2} p_i + L_3 \cdot p_3}{L_1 + L_2 + L_3}$$

Los p_i se calcularán teniendo en cuenta la expresión parabólica del radio de acuerdo definida anteriormente, $y=x^2/(2 \cdot Kv)$:

$$p_i = y' = \frac{x}{kv}$$

Donde x es la diferencia de espacio entre el punto del tren considerado y el comienzo de la parábola de acuerdo.

Se ofrecerá la posibilidad de realizar la simulación con los datos de pendientes discretas, cotas o perfil continuo con "kv". Sin embargo la simulación del modelo de ATO se hará siempre con las pendientes discretas como ocurre en la realidad.

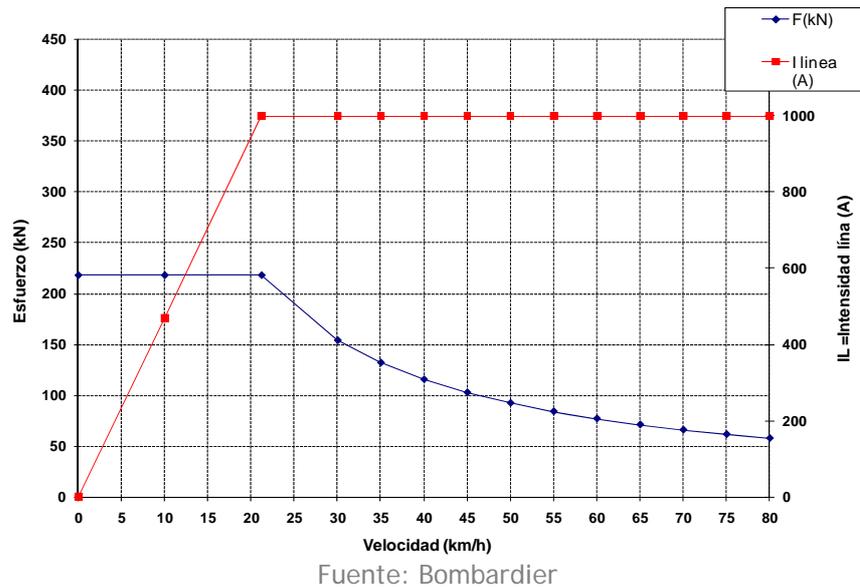
- Túneles: Se definirá la posición de inicio y fin de cada túnel del recorrido en el caso de que existieran zonas de vía subterránea y exterior, y su factor correspondiente que modificará la componente cuadrática de la resistencia al avance.
- Datos de red: Para la simulación del freno regenerativo será necesario especificar si se considera la red receptiva o no. En caso afirmativo se configurará el coeficiente de aprovechamiento de la energía devuelta. También será necesario el coeficiente de pérdidas de energía en catenaria y que afectará al consumo. Estos coeficientes se obtendrán del modelado del sistema eléctrico correspondiente a la fase 2 del proyecto ElecRail.

2.1.2 Datos del tren

Caracterizarán el tren que realizará el trayecto anteriormente descrito. La información que se introducirá será la siguiente:

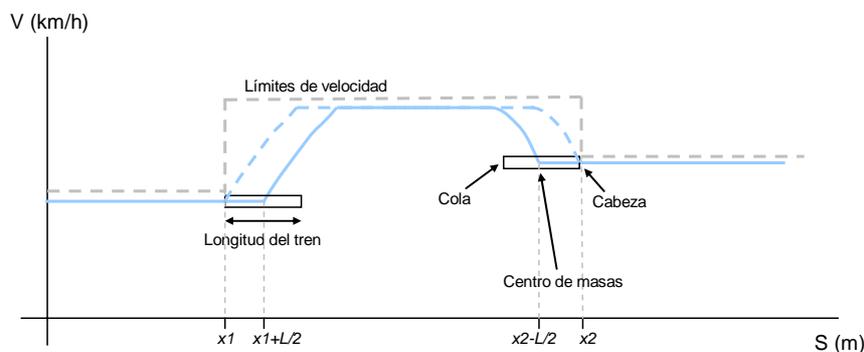
- **Curvas de Fuerza e Intensidad de tracción:** La curva de tracción se introduce como una lista de puntos fuerza-velocidad indicando, para cada velocidad, la fuerza máxima que el equipo de tracción es capaz de suministrar. Un ejemplo puede verse en la Figura 3. El simulador interpolará linealmente el valor de la fuerza entre los puntos de velocidad más cercanos en caso de que la velocidad del tren no sea una de las listadas. El mismo tratamiento se realiza con la curva de intensidad.

Figura 3. Curvas de tracción. Esfuerzo e Intensidad



- **Curva de Fuerza e Intensidad en el freno:** La forma de introducir las curvas y de tratarlas con el simulador es la misma que con las de tracción.
- **Resistencias al avance:** Para modelar las resistencias del tren circulando en llano (aerodinámicas, rozamientos, etc.), se deberán introducir los parámetros *a*, *b* y *c* de la curva de resistencia al avance, que permanecerán constantes a lo largo de toda la simulación.
- **Masa y longitud:** Se modelará el tren como una masa distribuida uniformemente a lo largo de su longitud y se calculará la pendiente media en toda su extensión como se vio anteriormente. La consideración de la longitud del tren tendrá repercusión en los cambios de consignas puesto que el tren al completo debe cumplir las restricciones de velocidad, desde la cabeza hasta la cola. En aumentos de restricción de velocidad, hasta que no pase la cola del tren por dicho aumento, éste no podrá comenzar a acelerar. Así mismo, en las reducciones de velocidad, será la cabeza del tren la que deberá llegar a la reducción con la velocidad adecuada, como puede observarse en la Figura 4.

Figura 4. Consideración de la longitud del tren.



- **Masa inercial:** Para calcular la aceleración del tren, es necesario considerar la masa real del tren más una masa adicional que modela la fuerza necesaria para aumentar la velocidad de rotación de las masas giratorias que existen en el tren. Esa masa adicional es la inercial y se introduce a modo de porcentaje que aumentará la masa en vacío del tren.
- **Ciclos de cálculo:** Para simular el comportamiento de los equipos electrónicos del tren, será necesario introducir el período de cálculo del equipo de ATO y del equipo de tracción.
- **Parámetros de consumo:** Para el cálculo del consumo es necesario tener en cuenta el rendimiento del motor. Este varía según la velocidad y el porcentaje de tracción que aplica respecto del valor máximo de fuerza. La variación del rendimiento con la velocidad se incorporará calculando unas curvas de tracción y freno "experimentales" suponiendo tensión de catenaria nominal y constante. La variación del rendimiento en función del porcentaje de tracción pedido se debe introducir a modo de coeficientes de penalización del rendimiento teórico. En concreto se establecerán dos valores: penalización del rendimiento para valores de fuerza de tracción menores que el 50% de la fuerza máxima, y para valores mayores del 50%.
- **Jerk:** El jerk se define como el incremento de aceleración en un intervalo de tiempo:

$$j = \frac{da}{dt}$$

y podría verse como un parámetro de confort que evita cambios bruscos de aceleración en el tren. El valor de jerk en m/s^3 deberá especificarse para su simulación.

- **Acumulador:** Será posible la simulación teniendo en cuenta un acumulador de energía embarcado en el tren. Para ello habrá que introducir sus parámetros característicos de carga máxima y mínima, potencia máxima y mínima suministrable, masa y rendimientos.

2.1.3 Datos de ATO

Caracterizarán el equipo de ATO a simular. La información que se introducirá será la siguiente:

Parámetros fijos:

- Límite de aceleración en m/s^2 .
- Límite de deceleración en m/s^2 .
- Offsets de velocidad en km/h.
- Distancia de seguridad al límite de velocidad máxima en el que hay que frenar.
- Deceleración de la curva de detección en m/s^2 .
- Valores de histéresis tracción-freno en m/s^2 . y tiempo mínimo en deriva en s.

Parámetros de las curvas de detección:

- Tiempos de retardo de cada uno de los ciclos.

- Aceleraciones de las curvas de detección en m/s^2 en función de la velocidad en km/h.
- Ganancias para el cálculo de la aceleración objetivo en la reducción de velocidad en función de esta en km/h.

Parámetros de las curvas de freno en punto de parada:

- Tiempo de seguridad de adelanto respecto a la posición real del tren en ms.
- Freno de retención en m/s^2 .
- Limitación del freno de servicio en m/s^2 .
- Ganancias para el cálculo de la aceleración objetivo en el frenado en punto de parada en función de la velocidad en km/h.

Parámetros variables para el diseño de marchas:

Estos serán los parámetros con los que se realizará el diseño de marchas. Los parámetros se combinarán entre sí (siempre que sean compatibles) para simular y representar una a una todas las marchas posibles.

- Espacios de validez de los parámetros en m.
- Consignas de tracción en %.
- Consignas de freno en m/s^2 .
- Velocidades de regulación en km/h.
- Velocidades de deriva en km/h.
- Velocidades de remotor en km/h.

2.1.4 Restricciones de confort

El simulador caracterizará las marchas simuladas informando si respetan o no las restricciones de confort especificadas:

- Velocidad mínima en km/h. La velocidad del tren excepto en el arranque y en el freno final, nunca deberá ser inferior a este valor.
- Número máximo de remotores. En caso de consigna deriva-remotor, se limita el número de máximo de ciclos a lo largo de una interestación.
- Rampa máxima en tracción en mm. Valor de rampa en mm a partir del cual no sería confortable cortar tracción para ejecutar una deriva.
- Duración mínima del modo en s. Tiempo mínimo que debe existir entre un cambio de deriva a remotor y viceversa.

2.1.5 Resultados

El resultado de la simulación será un listado de los puntos más significativos del trayecto, con la siguiente información:

En cada punto kilométrico.

- Velocidad.

- Aceleración.
- Intensidad.
- Fuerza
- Velocidad máxima permitida.
- Valor de la señal de ATO.
- Tiempo.
- Velocidad mínima.
- Pendiente vista por el ATO.
- Pendiente real.

Después de cada simulación.

- Tiempo total de recorrido.
- Consumo acumulado en la tracción.
- Energía regenerada.
- Cumplimiento de las restricciones de velocidad mínima y de confort.
- Trabajo mecánico.
- Energía devuelta a la red.
- Energía quemada en resistencias.
- Energía en el acumulador al comienzo y fin de la simulación.

En la simulación de una marcha.

- Un gráfico Espacio-Velocidad con el perfil de la marcha simulada, y las velocidades máximas y mínimas.
- Un gráfico con el perfil del terreno con las pendientes grabadas en el equipo de ATO y con las pendientes utilizadas para la simulación, con "Kv" o con cotas en m.

En el diseño de marchas

- Una nube de puntos Tiempo-Consumo en la que se representarán todas las marchas simuladas distinguiéndose por el color las que son confortables de las que no y las que se han simulado con acumulador de las que no lo han tenido en cuenta.

2.2. Diseño modular del simulador

Para ajustar las simulaciones lo mejor posible a la realidad, se dividirá el simulador en módulos independientes que representen el comportamiento de los subsistemas reales. Los distintos módulos del simulador deben comunicarse entre sí emulando las señales reales que transmiten los subsistemas y que permiten validar la entrada-salida de cada módulo con las entradas y salidas reales previamente registradas. De esta manera, se hace posible la validación por separado del modelo de cada subsistema, identificando y aislando errores y ajustando el nivel de detalle del modelado de cada uno hasta obtener la precisión suficiente. Una vez validado el

modelo de cada subsistema, se validará el simulador global, y posibles fuentes de error podrán ser aisladas en el módulo correspondiente.

El simulador funcionará por paso discreto de tiempo y el paso de simulación deberá ser un submúltiplo de los valores de los períodos de cálculo del equipo de tracción y ATO especificados.

En cada paso de simulación el tren podrá estar funcionando en modo de tracción, de deriva o de freno. Simultáneamente deberán ejecutarse los algoritmos que comprueben si el tren se aproxima a una reducción de velocidad máxima o a una parada.

Si no existe consigna de deriva, el tren circulará en el modo de tracción cuando viaje a una velocidad inferior al límite permitido en ese momento, tratando de aumentar la velocidad hasta alcanzarla o cuando trate de mantener su velocidad, compensando la resistencia al avance. Circulará en el modo de deriva sólo si en la simulación se ha especificado que la consigna enviada por baliza es de deriva-remotor. Y deberá hacer uso del freno al aproximarse a una reducción de velocidad o a la parada en una estación.

2.2.1 Módulo del ATO

Tracción

En el caso de que la marcha a seguir sea de regulación, ya sea a velocidad máxima (marcha tendida) o a una velocidad constante, el ATO pide una aceleración proporcional a la diferencia que existe entre la velocidad real del tren y la objetivo según la siguiente ecuación:

$$a_o = K \cdot (V_{\text{objetivo}} - V) + a_p \quad (m/s^2)$$

donde a_p es la aceleración necesaria para corregir el desnivel del terreno y cuyo signo depende de si este desnivel es una rampa (positivo) o una pendiente (negativo) y K es una constante.

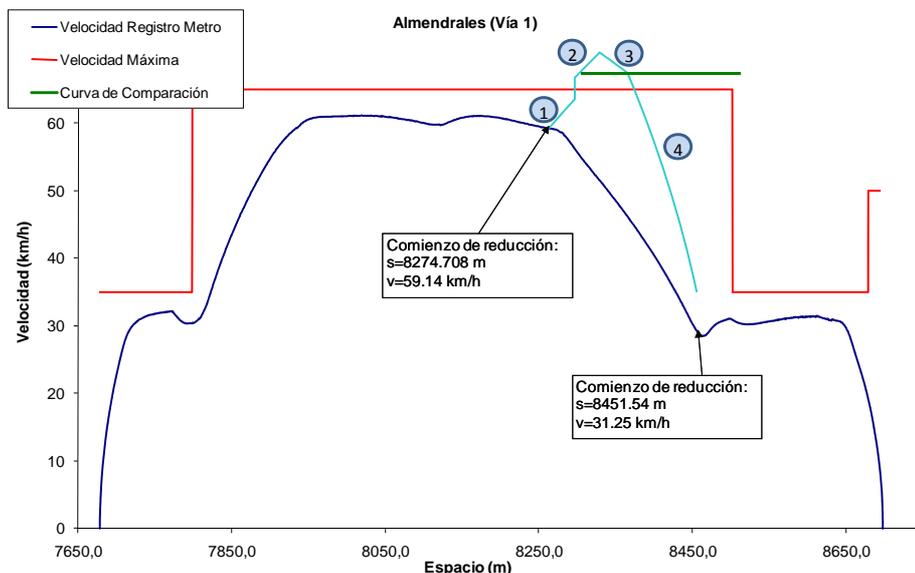
Esto provoca que en el arranque, se pidan aceleraciones muy grandes al encontrarse el tren muy lejos de la velocidad máxima de circulación. Por ello, esta aceleración objetivo se limitará al valor máximo especificado.

Tren detectando reducción de velocidad ante disminución de velocidad máxima

El equipo de ATO guarda en memoria el perfil de velocidades máximas de la vía para cada punto kilométrico. De esta manera, ante una reducción próxima del límite de velocidad máxima, el equipo de ATO debe dar una señal de aceleración objetivo tal que permita llegar al punto de reducción (con una distancia de seguridad) a la velocidad que marque el límite (menos un offset) en un espacio suficiente para que no existan cambios bruscos de velocidad.

El algoritmo de cálculo del ATO para la detección de freno constará de cuatro estados distintos tras los cuales se hará una comparación de distancias que determine si el tren debe comenzar a frenar o no. Se explicará su funcionamiento a partir de la Figura 5.

Figura 5. Representación gráfica del algoritmo de detección de reducción de velocidad en la interestación de Almendrales.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

“Look-Ahead Stage” (Tracción)

El tren tracciona durante t_1 s con una aceleración $a_1 = a(v) \pm \text{gradiente}$ recorriendo una distancia d_1 y finalizando el estado con una velocidad v_1

“Remove Traction Stage” (Tracción)

De nuevo se simula la tracción del tren a partir de una velocidad v_1 , obtenida a partir de la v_1 anterior con un coeficiente de seguridad, con una aceleración $a_2 = a(v) \pm \text{gradiente}$. Este estado tiene una duración t_2 durante el cual el tren recorre una distancia d_2 .

“Emergency Brake Response Stage” (Deriva)

Tras el estado anterior el tren deriva durante t_3 s en los que recorre una distancia d_3 quedándose el tren con una velocidad v_3

“Braking Profile Stage” (Freno)

El tren ahora frenaría con una deceleración $a_4 = a \pm \text{gradiente}$ de manera que alcance una velocidad v_4 impuesta por el límite de velocidad.

Tras estos cuatro pasos se calculará la distancia de frenado como $K_2 \cdot (d_4 + d_3 + d_2)$. Si este espacio es mayor que la distancia a la restricción desde el inicio del segundo estado, entonces el ATO detectará que debe reducir desde la posición actual hasta el punto de la reducción, que estará situado un offset por debajo del límite velocidad y una distancia de seguridad antes. Tanto el valor del offset como el de la distancia de seguridad dependerán de la velocidad.

2.2.2 Tren reduciendo velocidad ante disminución de velocidad máxima

Una vez detectado el comienzo del freno según el algoritmo anterior, el ATO entrará en un nuevo modo de funcionamiento. A partir del punto de detección, calculará una curva de referencia con la aceleración necesaria para llegar al punto situado a la distancia de seguridad antes del límite de velocidad y a la velocidad máxima menos el offset. La aceleración objetivo, se calculará utilizando la velocidad y aceleración de dicha curva según la siguiente ecuación:

$$a_o = k(V) \cdot (V_{ref} - V) - a_{ref} + a_p$$

Donde a_{ref} es la aceleración de la curva de referencia, a_p es la aceleración debida al desnivel del terreno (positiva en rampas y negativa en pendientes), V_{ref} es la velocidad de la curva de referencia objetivo del ATO y $k(V)$ es un parámetro que depende de la velocidad.

Tren detectando comienzo de freno ante parada en estación

Al igual que ante reducción de velocidad máxima, el ATO tratará de detectar en todo momento el punto de parada próximo para asegurar un frenado hasta detención total del tren con deceleraciones que no superen un valor máximo y con transiciones suaves desde el estado anterior hasta el freno máximo. Sin embargo en este caso la detección del punto en el que el tren debe comenzar la reducción se hará con un algoritmo diferente.

Desde el comienzo de la simulación se guardará en memoria la curva de freno que deberá seguir el tren según la deceleración de baliza y calculada desde el punto de parada hacia atrás. Además se tendrá en cuenta el gradiente únicamente si es negativo y si su valor sumado al de la deceleración de baliza, da como resultado una deceleración mayor de a_{lim} (limitación de freno de servicio). Por tanto, la aceleración de la curva de referencia será la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{si } a_p < 0 \text{ y } a_{baliza} - a_p \geq a_{lim} &\Rightarrow a_{ref} = a_{lim} + a_p \\ \text{en otro caso } a_{ref} &= a_{baliza} \end{aligned}$$

con a_p la aceleración introducida por la gravedad y de signo negativo si es una pendiente.

En cada ciclo el ATO calculará el espacio resultante de adelantarse 450ms con la aceleración máxima desde la velocidad y posición del tren en ese instante. En el espacio resultante y con la velocidad real del tren se comprobará que el error de velocidad derivado de la siguiente ecuación sea 0 o negativo, en tal caso comienza el freno.

$$error = k(V) \cdot (V_{referencia} - V) - a_{referencia}$$

Siendo $a_{referencia}$ y $V_{referencia}$ la aceleración y la velocidad de la curva de referencia respectivamente y $k(V)$ nuevamente dependiente de la velocidad.

Tren frenando ante punto de parada en estación

Una vez detectado el freno, entrará un nuevo modo de funcionamiento. El ATO calculará la deceleración objetivo regulando alrededor de la curva de referencia como indica la siguiente ecuación:

$$a_o = k(V) \cdot (V_{referencia} - V) - a_{referencia} + a_p$$

con $a_{referencia}$ y $V_{referencia}$ la aceleración y la velocidad de la curva de referencia respectivamente $k(V)$ de distinto valor en función de la velocidad.

La obtenida mediante la ecuación anterior será la aceleración objetivo que se le pedirá a los motores excepto si la aceleración del paso anterior de simulación es menor que la resultante y el modo era de tracción (pendiente muy fuerte), en ese caso se continuará en tal modo. De igual forma si el modo anterior era freno por reducción se continuará en él. Si la aceleración objetivo es positiva, así como la aceleración del paso anterior de simulación, se derivará. Al alcanzarse una velocidad de 1 km/h, se dejará de aplicar dicha ecuación y se pedirá freno de retención.

Tren derivando

Cuando el ATO tenga orden de hacer ciclos de deriva-remotor, chequeará en todo momento si la velocidad de deriva de consigna se alcanza, respetando siempre los límites máximos de velocidad, por lo que si antes de llegar a derivar, debe comenzar a reducir, lo hará. Una vez comenzada la deriva se chequeará también el cumplimiento de límites. Si llega a una velocidad máxima se regulará. Además, una vez comenzado un freno por reducción de velocidad máxima, se sigue comprobando si es posible derivar. Si derivando se va a conseguir la velocidad de reducción objetivo en el espacio objetivo, se dejará de frenar, para derivar.

Módulo del Motor

Este módulo tratará de simular el comportamiento del material móvil. La señal de entrada del módulo será la que se obtenga del módulo de ATO anterior. A partir de ella se realizará el cálculo de la fuerza necesaria que debe dar el motor para que el tren pueda dar la aceleración que el ATO le pone como objetivo. Como resultado se obtiene el esfuerzo eléctrico tanto de tracción o freno, que deben aplicar los motores. Asimismo se obtendrá la intensidad que consume o devuelve, según el caso, el equipo de tracción para el posterior cálculo del consumo de energía.

Para reproducir el algoritmo de cálculo del esfuerzo del motor es necesario distinguir entre modos de funcionamiento al igual que ocurría con el modelo de ATO, en este caso dos, freno o tracción.

Freno

El modelado del motor durante el freno, se hace utilizando la Ley de Newton:

$$F = m \cdot a$$

donde a es la aceleración objetivo calculada por el ATO y m la masa total del tren teniendo en cuenta el porcentaje del peso de las inercias. La fuerza que se obtiene con este cálculo es la que ejercen los motores para el movimiento del tren a la velocidad deseada.

Tracción

Traccionando, la aceleración objetivo calculada por el ATO se utiliza como un porcentaje de fuerza respecto a la fuerza máxima para cada velocidad obteniéndose el esfuerzo motor.

$$F_{motor} = a_o \cdot F_{max}$$

Este esfuerzo, no debe superar en ningún caso la restricción de aceleración objetivo máxima y por tanto la fuerza a esa aceleración.

En ambos modos es importante incluir en los algoritmos el ciclo de cálculo del motor y la restricción de jerk.

Módulo de dinámica

Para cerrar el ciclo del comportamiento del tren, debe calcularse para cada paso de simulación la nueva velocidad y posición. Para ello es necesario reproducir las fuerzas de resistencia al avance que modifican la aceleración final del tren respecto a la calculada por el ATO y que determinan la velocidad final.

El perfil de la vía (rampas y pendientes), las curvas y la resistencia aerodinámica introducen también fuerzas resistentes. Por ello es necesario conocer tanto los datos de vía, como los coeficientes de resistencia aerodinámica del tren a simular. Con estos datos y a partir de la fuerza motor resultado del módulo anterior se hace un balance de fuerzas y se obtiene la nueva posición del tren, su aceleración y velocidad real.

Resistencia aerodinámica

Se considerará la resistencia específica al avance, "Rv", en función de la velocidad del tren, v, en $\frac{km}{h}$ como:

$$R_v = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

Con A, B y C parámetros configurables que permanecerán constantes a lo largo de toda la simulación.

Resistencia debida a las curvas y a la gravedad

Para tener en cuenta la resistencia al avance debida a las curvas se realizará la siguiente operación:

$$F_R K = \frac{Cr_0}{R - Cr_1} = \frac{9.81 \cdot 514}{1000 \cdot R}$$

Conocidas además las pendientes del terreno "p" en mm (valor de su seno o tangente, iguales para ángulos pequeños, dividido entre 1000), se obtiene una "rampa ficticia" en milésimas que engloba la resistencia debida a la gravedad y a las curvas:

$$p + \frac{514}{R}$$

Por tanto, en el modelo se calculará una aceleración que se oponga a la objetivo obtenida del modelo de ATO de valor:

$$\frac{9.81}{1000} \cdot \left(p + \frac{514}{R} \right)$$

La aceleración final será el resultado del balance de fuerzas entre la fuerza motor y las fuerzas resistentes:

$$\sum F = F_{motor} - F_p - F_r = M_I \cdot a$$

donde F_{motor} es la fuerza resultado del módulo motor, F_p es la fuerza resistente debida a las curvas y a la gravedad, F_r es la fuerza debida a la resistencia aerodinámica, M_I es la masa del tren teniendo en cuenta la carga y el porcentaje de peso de las masas rotatorias y a es la aceleración que se obtiene en el módulo.

Una vez obtenida la aceleración, bastará con asumir que en el paso de simulación el tren realiza un movimiento uniformemente acelerado para obtener la nueva velocidad y la nueva posición.

$$v_f = v_o + a \cdot \Delta t$$

$$s_f = s_o + v_o \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2$$

Donde v_o y s_o son la velocidad y el espacio al comienzo del paso de simulación respectivamente y v_f y s_f la velocidad y el espacio tras el paso de simulación, Δt el paso de simulación y a la aceleración del tren que se supone constante durante el paso de simulación.

Módulo de consumo

Es necesario un módulo en el que se calcule el consumo que supone el recorrido de cada interestación en función de la marcha simulada.

La energía consumida se calculará a partir de la intensidad que resulta del modelo del motor en el caso de que esta sea positiva. Si la intensidad es negativa significa que el motor está frenando y por tanto regenerando energía.

De este módulo se obtendrá además el trabajo mecánico realizado por el tren a partir de la fuerza resultado del modelo del motor.

El consumo eléctrico en la tracción se calcula como la potencia eléctrica del tren por incremento de tiempo, esto es:

$$\text{Consumo} = I \cdot U \cdot \Delta t$$

donde la tensión es la nominal y la intensidad se calcula a partir del porcentaje de fuerza pedido por el motor, del rendimiento y de la intensidad máxima del modelo del motor.

$$\eta = \frac{F \cdot v}{I \cdot U} \Rightarrow \frac{F_{max} \cdot v}{I_{max} \cdot U} = \frac{F \cdot v}{I \cdot U} \Rightarrow I = \frac{F}{F_{max}} \cdot I_{max}$$

Si el tren está frenando, la intensidad será negativa, es decir, generada por los motores, y en ese caso se considerarán dos posibilidades

- Inyectar a red toda la energía regenerada si la red es receptiva.
- Almacenarla en acumuladores embarcados.

Se dotará al simulador con un acumulador de energía embarcado en el tren. Este tipo de acumuladores tiene menor capacidad de almacenamiento energético que los acumuladores fijos, pero por otro lado evitan las pérdidas de transmisión de la energía a lo largo de la catenaria, $P = R \cdot I^2$. El acumulador se conecta directamente al inversor de corriente que alimenta a los motores.

Durante el frenado, la energía cinética del tren se almacenará en el acumulador. En el siguiente periodo de tracción o arranque, el tren tomará la potencia necesaria del acumulador en primer lugar, y en el caso de que no sea suficiente, de la red eléctrica.

Por otro lado, si los equipos auxiliares se alimentan mediante la red eléctrica, el acumulador tendrá prioridad sobre ellos, es decir, siempre que el acumulador disponga de energía suficiente para alimentarlos, así lo hará.

La ecuación de carga que regirá al acumulador durante un frenado será

$$\Delta E_{ac} = F \cdot v \cdot \Delta t \cdot \eta_c - \frac{P_{aux} \cdot \Delta t}{\eta_d}$$

$$E_{ac,final} = E_{ac,inicial} + \Delta E_{ac}$$

siendo F la fuerza correspondiente a la velocidad del tren en ese instante, v la velocidad del mismo, Δt el intervalo de tiempo de ese paso de simulación, η_c el rendimiento de carga del acumulador, P_{aux} la potencia consumida por los equipos auxiliares, y η_d el rendimiento de descarga del acumulador. Esta ley de carga del acumulador se cumplirá en todos los procesos de frenado hasta que se llegue a la capacidad máxima del mismo. El rendimiento de carga del acumulador η_c es un rendimiento compuesto que abarca desde la transformación de energía mecánica a eléctrica durante el frenado, hasta el almacenamiento de la misma en el acumulador.

Esta ecuación indica que, durante un proceso de frenado, al mismo tiempo que el acumulador se está cargando debido al mismo, también está cediendo la energía necesaria para la alimentación de auxiliares, de manera que el balance neto de la energía acumulada es la suma de estos dos términos.

Por otro lado, durante los procesos de tracción, el acumulador servirá de apoyo a la red eléctrica, y cumplirá la lógica de funcionamiento siguiente:

Si la energía que necesita el tren durante un paso de simulación es menor que la energía necesaria para satisfacer dicha demanda contenida en el acumulador;

$$\text{Si } E_{ac,inicial} \geq \frac{\frac{F \cdot v \cdot t}{\eta_t} + P_{aux} \cdot t}{\eta_d}$$

siendo F la fuerza correspondiente a la velocidad del tren en ese instante, v la velocidad del mismo, t el intervalo de tiempo de ese paso de simulación, η_t el rendimiento de tracción del tren, P_{aux} la potencia consumida por los equipos auxiliares y η_d el rendimiento de descarga del acumulador, entonces dicha energía es suministrada íntegramente por el acumulador, que ve reducida su energía en esa misma cantidad;

$$\Delta E_{ac} = \frac{\frac{F \cdot v \cdot \Delta t}{\eta_t} + P_{aux} \cdot \Delta t}{\eta_d}$$

$$E_{ac,final} = E_{ac,inicial} - \Delta E_{ac}$$

En caso contrario, el acumulador cederá toda la energía que le quede disponible, y el resto será suministrada por la catenaria.

$$\Delta E_{ac} = E_{ac,inicial}$$

$$E_{ac,final} = E_{ac,inicial} - \Delta E_{ac} = E_{ac,min}$$

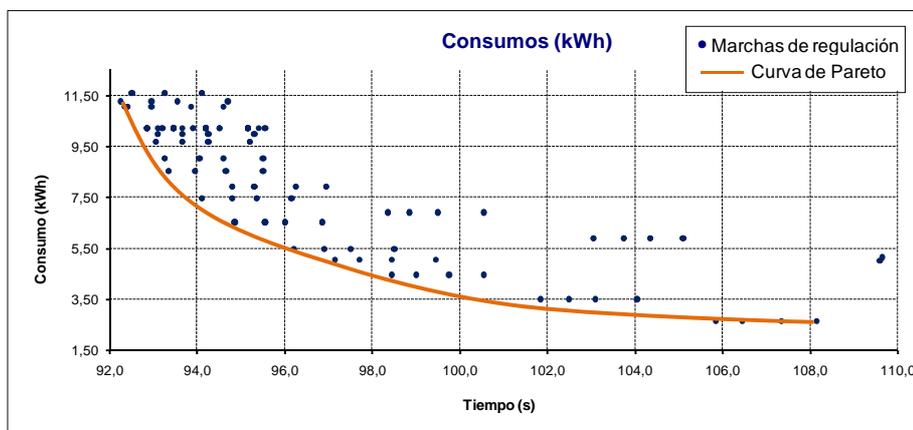
$$E_{red} = \frac{F \cdot v \cdot t}{\eta_t} + P_{aux} \cdot t - \Delta E_{ac} \cdot \eta_d$$

2.3. Procedimiento de diseño

El problema de diseño de marchas parte de que cada posible conducción tiene por atributos un consumo y un tiempo de recorrido siendo incompatible la optimización de ambas simultáneamente. El consumo de cada marcha representa su coste, definiendo un problema típico de diseño multiobjetivo en el que es necesario encontrar un compromiso entre los tiempos de recorrido y los costes. Los tiempos de recorrido de las cuatro marchas diseñadas idealmente, además han de cubrir un rango de tiempos de entre 10 y 20 segundos, y deben estar uniformemente distribuidas.

En teoría de la decisión este tipo de problemas se estudian representando el conjunto de soluciones en un gráfico consumo tiempo, sobre el que se calcula la envolvente de soluciones óptimas denominada "curva de Pareto" (representada en naranja en la Figura 6).

Figura 6. Nube de puntos con marchas de regulación posibles en interestación típica y curva de Pareto.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Si la nube de puntos es suficientemente densa, las soluciones deberán de estar necesariamente sobre esta curva, ya que cualquier otro punto fuera de ella está "dominado", es decir, hay otro punto de la curva que tiene igual tiempo de recorrido y menor consumo.

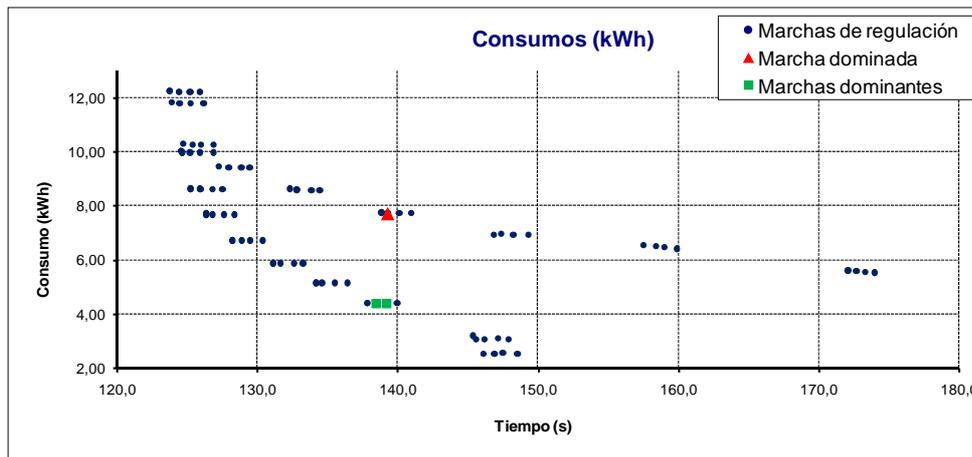
En el análisis de las nubes de puntos de marchas de regulación, por lo general existen zonas de densidad de puntos alta (en los que la curva de Pareto es también muy densa y domina al resto de la nube) y zonas en las que la nube se dispersa y no hay soluciones para todos los tiempos. Además, generalmente la pendiente de la curva de Pareto es muy fuerte para tiempos próximos al mínimo, y se suaviza progresivamente al aumentar el tiempo de recorrido.

A continuación se explican los criterios que se emplearán a la hora de diseñar marchas económicas con un compromiso entre el consumo y el tiempo de viaje. Estos criterios se aplicarán para las marchas 1, 2 y 3, puesto que la marcha 0 es siempre la más rápida, la tendida.

Criterio de dominación

El criterio de dominación propone escoger soluciones sobre la curva de Pareto, es decir, las de menor consumo para los tiempos elegidos. Por ejemplo, en la nube de soluciones siguiente (Figura 7) la marcha señalada en rojo está dominada por otras dos marchas que cumplen aproximadamente el mismo tiempo de recorrido.

Figura 7. Aplicación del criterio de dominación.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

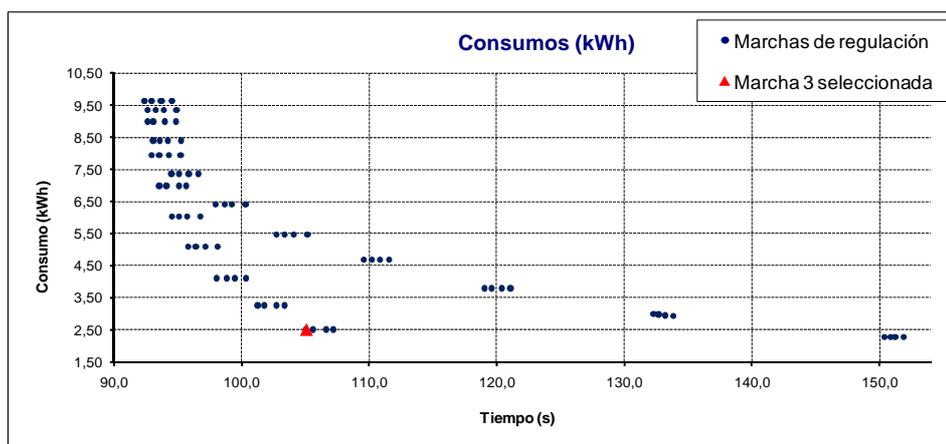
Criterio de sensibilidad del consumo

La forma típica de la curva óptima de soluciones disminuye progresivamente su pendiente desde la marcha tendida a medida que aumenta el tiempo de recorrido. En análisis de sensibilidad, esto quiere decir que cerca de la marcha tendida el coste energético asociado a cada segundo es muy alto, y disminuye progresivamente hasta valer prácticamente 0 al final de la curva (insensibilidad).

Por lo tanto, conviene que el rango de tiempos de regulación se sitúe en lo posible en la zona donde el coste del segundo es alto y aprovechar al máximo todo el intervalo de tiempos sensible.

En la Figura 8 se ha situado la tercera marcha de regulación en la zona plana de la curva de Pareto, donde no es posible conseguir más ahorro de energía con un tiempo de recorrido mayor. Siempre que sea posible, se deberá aprovechar completamente la zona de sensibilidad alta de la curva aumentando el rango de tiempo de regulación al máximo posible.

Figura 8. Aplicación del criterio de sensibilidad.



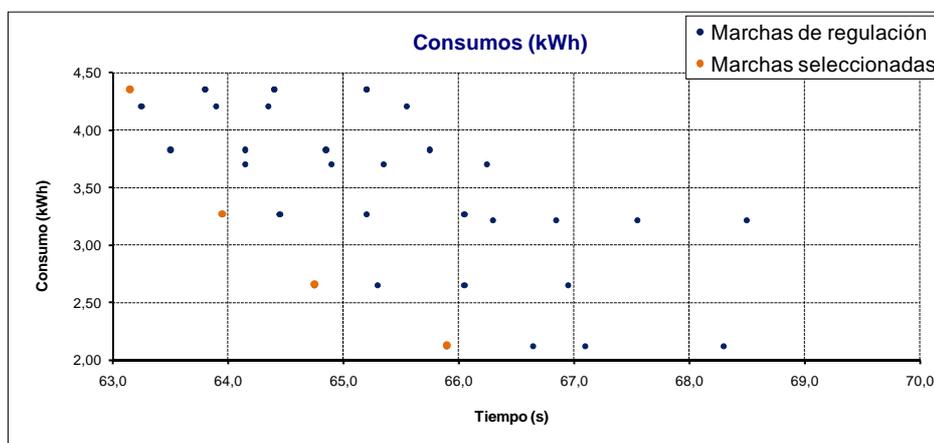
Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Criterio de distribución temporal uniforme

Un tercer criterio de selección de marchas corresponde a la distribución uniforme de los tiempos de recorrido de las marchas dentro del margen de regulación. En el caso de Metro, en el que se diseñan cuatro marchas de regulación, los tiempos de recorrido entre marchas consecutivas deberían de ser aproximadamente un tercio de la diferencia de tiempos entre marcha 0 y marcha 3.

Este criterio afecta a la selección de las marchas 1 y 2. Como ejemplo de aplicación se presenta la Figura 9.

Figura 9. Aplicación del criterio de distribución uniforme



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

El diseño propuesto en este caso comienza por la aplicación del criterio de sensibilidad para aprovechar al máximo el rango de sensibilidad energética, aumentando el tiempo de recorrido de la marcha más lenta hasta la zona plana de la curva de Pareto. A continuación se aplica el criterio de distribución temporal uniforme para situar las marchas 1 y 2.

Por tanto, una vez configurados todos los parámetros del equipo de ATO, del material móvil y de vía y establecidas las restricciones de confort, puede realizarse el diseño de las marchas.

La herramienta simulará todas las combinaciones de parámetros del ATO posibles generando una hoja nueva para cada interestación. Cada marcha simulada estará representada en un gráfico tiempo-consumo en verde si cumple todas las restricciones de confort, o en rojo si no es confortable según alguno de los criterios.

A partir de las nubes de puntos de las marchas y seleccionando la marcha tendida como marcha 0, se seleccionarán las otras tres marchas de regulación atendiendo a los criterios de dominación, sensibilidad y distribución uniforme de tiempos anteriores.

Según se tengan en cuenta acumuladores de energía embarcados o no en el tren, frenado regenerativo, etc., se obtendrán diferentes formas de la nube de puntos y por lo tanto dará lugar a soluciones diferentes de conducción.

3. MODELO DE DISEÑO DE HORARIOS

Diseñar un horario de una línea de metro determinada con diversas estaciones equivale a determinar la marcha nominal de cada interestación que permita llegar en el tiempo establecido a las estaciones cabecera recuperando retrasos en el caso de que existan incidencias.

Un horario comercial lleva implícito el tiempo de recorrido entre cada dos estaciones que se calcula con la marcha nominal de cada interestación. Esta marcha nominal se corresponde con una de las 3 diseñadas (la cuarta es la tendida) mediante el procesamiento del punto anterior. De esta forma se consigue un consumo menor al máximo y se asegura que en el caso de que exista alguna incidencia durante el recorrido, se cuente con un tiempo de reserva que se pueda emplear en la recuperación de los retrasos.

Al tratarse de conducción automática, no es posible cambiar las consignas de la marcha en ejecución durante el recorrido entre dos estaciones, por lo tanto, en el caso de que se produzca una incidencia en una interestación, el tiempo perdido en ella deberá recuperarse en el recorrido de la siguiente, seleccionando para ello, en lugar de la marcha económica, la tendida. Esto ocurre a diferencia de la conducción manual, en la que el retraso puede ser recuperado por el conductor si modifica su conducción en cuanto se produzca la incidencia.

Por tanto, el objetivo del diseño eficiente del horario es doble:

1. Conseguir un reparto de colchones de tiempo óptimo que posibilite el máximo ahorro energético en la línea completa obteniéndose de este la marcha nominal para cada interestación.
2. Garantizar que dicho reparto de colchones posibilite la recuperación de incidencias llegando el tren a las estaciones cabecera en el tiempo deseado.

3.1. Modelo matemático de reparto óptimo de colchones en tramos.

El cálculo de la marcha mínima se hará mediante simulación como se vio en el apartado anterior. A partir de ella y con una diferencia máxima en tiempo de recorrido, se deberá encontrar la marcha nominal para cada interestación. Esta será la marcha de recorrido en situación normal y que asegurará una reserva de tiempo tal que sea posible la recuperación de retrasos e incidencias en la línea. La marcha nominal deberá escogerse de entre las posibles, atendiendo también a requisitos de eficiencia energética

Actualmente Metro de Madrid establece la máxima diferencia de tiempo entre la marcha tendida y la más lenta en un máximo de 20s. De esta forma, el recorrido de cada una de las estaciones de la línea estará acotado entre un tiempo de recorrido mínimo (el de la marcha tendida) y un tiempo de recorrido máximo. Lo mismo sucederá para el tiempo de recorrido de la línea completa. Entre esos intervalos de tiempo estará la marcha nominal.

Se deberá por tanto, seleccionar el colchón de tiempo de cada interestación que da lugar a la marcha nominal. Éste será el tiempo total disponible tanto para absorber

retrasos como para invertir en realizar una conducción más económica que la marcha tendida. Si solo importase el criterio energético, el colchón sería tan grande como se quisiera, pero además hay que atender al criterio comercial y de explotación de la línea, de manera que para el diseño del colchón de tiempo total hay que llegar a un compromiso entre estos dos factores.

Cada estación tendrá un perfil diferente y unos límites de velocidad distintos, lo que las caracterizará con curvas de Pareto diferentes. Esta es la curva de mínimo consumo energético a igualdad de tiempo de recorrido de todos los posibles, como mostraba la Figura 6. Estas curvas serán generadas para cada tramo entre dos paradas consecutivas con el simulador previamente descrito. Por lo tanto, el decremento de consumo por incremento de tiempo es distinto en cada interestación, y por tanto el colchón óptimo en cada una de ellas será diferente. Al escoger un colchón determinado de una interestación, automáticamente queda fijada su marcha y consumo asociado, dado por el punto de la curva de Pareto.

Dado que se realizarán diferentes grupos de simulaciones dependiendo de si el tren usa frenado regenerativo o no, de si usa acumulador embarcado o no, etc, esto dará lugar a diferentes nubes de puntos para cada interestación y por lo tanto a diferentes horarios comerciales.

La nomenclatura que se empleará para el modelo de optimización será la siguiente:

Índices

i Número de estación.

w Índice de escenarios (posible retraso)

j Número de líneas de la poligonal que aproxima la Curva de Pareto.

VARIABLES Y PARÁMETROS

T_i Tiempo total de recorrido entre estaciones cabecera.

$\overline{T_{pi}}, \underline{T_{pi}}$ Máximo y mínimo tiempo de parada en la estación i .

$\overline{T_{ri}}, \underline{T_{ri}}$ Máximo y mínimo tiempo de recorrido entre la estación $i-1$ y la estación i .

H_{ii} Tiempo de salida de la estación i en el horario diseñado. En el caso de la estación de destino, será el tiempo de llegada.

H_i Holgura de tiempo asignada al recorrido entre la estación $i-1$ y la estación i .

C_i Consumo energético del recorrido entre la estación $i-1$ y la estación i .

P^w Probabilidad del evento w .

R_i^w Retraso en la salida de la estación i en el evento w .

A_{ij}, B_{ij} pendiente y ordenada del tramo j de la curva de Pareto del gráfico tiempo-consumo en la estación i .

En adelante, las mayúsculas se emplearán para las variables, y las minúsculas para los parámetros del modelo.

Función objetivo

La función objetivo de este modelo consistirá en minimizar el consumo energético asociado a un horario nominal, sujeto a restricciones de recuperación de incidencias, como indica la expresión siguiente:

$$\min \sum_{i>1} C_i$$

Restricciones

Como se introdujo previamente, la marcha nominal será definida con las variables T_{pi}, H_i . La primera indica el tiempo de parada en cada estación, y la segunda indica la holgura de tiempo disponible para el tramo desde la estación $i-1$ hasta la estación i , de tal forma que el tiempo de recorrido de un tramo será igual a la suma del tiempo de recorrido mínimo asociado al mismo y su holgura de tiempo asociada:

$$T_{ri} = \underline{t}_{ri} + H_i, \forall i$$

Estas dos variables estarán acotadas de la siguiente manera:

El tiempo de parada en cada estación deberá estar comprendido entre unos valores mínimo y máximo, valores que serán asignados a los parámetros correspondientes al comienzo de la optimización:

$$\underline{t}_{pi} \leq T_{pi} \leq \overline{t}_{pi}, \forall i$$

El máximo valor de la holgura de tiempo disponible en cada tramo será igual a la diferencia entre los tiempos de recorrido máximo y mínimo entre la estación $i-1$ y la estación i .

$$0 \leq H_i \leq \overline{t}_{ri} - \underline{t}_{ri}, \forall i > 1$$

Una vez que se determinan los valores de las distintas holguras de tiempo en cada tramo, el consumo mínimo asociado a ese recorrido entre la estación $i-1$ y la estación i vendrá dado por la curva de Pareto correspondiente a ese tramo mediante la expresión:

$$C_i \geq a_{ij} (\underline{t}_{ri} + H_i) + b_{ij}, \forall i > 1 \forall j$$

Por otro lado, la hora de salida de la estación i será igual a la suma de la hora de salida de la estación $i-1$, el tiempo mínimo de recorrido del tramo entre la estación $i-1$ y la estación i , la holgura de tiempo asociada al mismo tramo, y el tiempo de parada en la estación i , lo cual se refleja mediante las siguientes expresiones matemáticas:

$$H_{ii} = H_{ii-1} + (\underline{t}_{ri} + H_i) + T_{pi}, \forall 1 < i < I$$

$$H_{i1} = 0$$

$$H_{ii} = H_{ii-1} + (\underline{t}_{ri} + H_i)$$

La segunda ecuación expresa que se toma como referencia la hora de salida de la estación 1, mientras que la tercera ecuación es el caso particular de la estación de destino, y expresa el tiempo de llegada a la misma como la suma de la hora de llegada a la estación anterior más el tiempo de recorrido mínimo en el tramo entre la estación penúltima y la de destino, más la holgura correspondiente a dicho tramo.

Se debe satisfacer que el tiempo de llegada a la última estación sea menor o igual al tiempo de recorrido desde la estación inicial a la de destino, es decir, al tiempo fijado en el horario para el trayecto completo:

$$H_{ul} \leq t_l$$

Ahora, para tener en cuenta los posibles escenarios de retrasos, se deberán satisfacer las mismas ecuaciones en cuanto a horas de salida, solo que añadiendo un término que indica el retraso producido en la estación i :

$$H_{ii} = H_{ii-1} + \underline{t_{ri}} + H_i + T_{pi} + r_i, \forall i \neq 1,$$

$$H_{i1} = r_1$$

$$H_{ul} = H_{ul-1} + (\underline{t_{rl}} + H_l) + r_l$$

Normalmente se considerará que el retraso en la estación de origen es nulo.

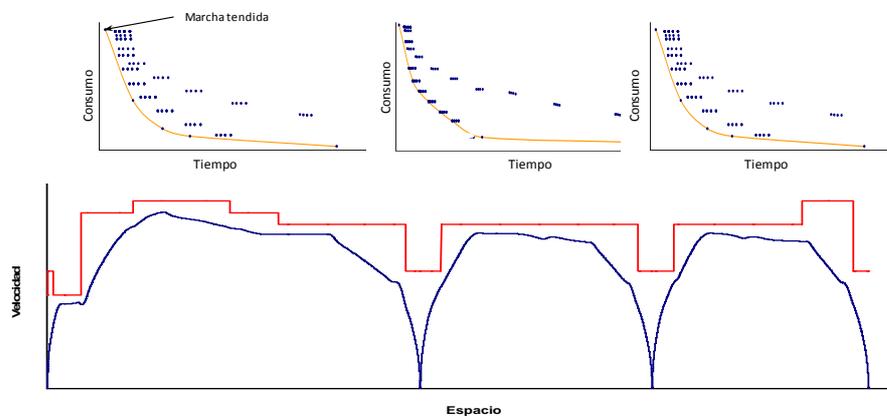
3.2. Datos de entrada del modelo

Los datos de entrada para el recorrido de una línea completa serán por tanto los siguientes:

- Colchón de tiempo total entre estaciones cabecera.
- Curvas de Pareto procedentes de las nubes de puntos que se generarán como resultado de las diferentes combinaciones de modos de conducción entre paradas, como puede observarse en la Figura 10. Las curvas de Pareto se modelarán como un conjunto de segmentos de líneas unidos que formarán una poligonal convexa como se ve en la Figura 11.
- Distribución de retrasos. Se supondrá que los posibles retrasos son generados en las paradas.

Estos datos se introducirán en el modelo matemático descrito anteriormente, y como resultado se obtendrá la marcha nominal para cada interestación y el horario comercial en las estaciones cabecera.

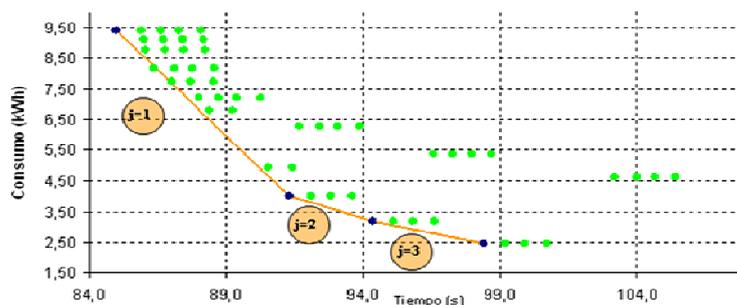
Figura 10. Trayecto completo y curvas de Pareto en cada tramo.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

El objetivo del modelo así descrito será encontrar el perfil de velocidad nominal para la conducción en operación normal, de tal manera que, cuando ocurre un retraso, el tiempo perdido podrá ser recuperado con un perfil de velocidades más rápido con el consiguiente aumento del consumo energético. La diferencia entre el tiempo asociado al perfil de velocidad nominal y el tiempo asociado a la marcha tendida en cada tramo es igual al colchón de tiempo disponible en el mismo. Será por tanto deseable que el modelo asigne mayores colchones de tiempo a tramos en los que el gradiente de la curva de Pareto sea mayor, lo cual indica lugares de potencial de ahorro energético mayor.

Figura 11. Curva de Pareto como poligonal convexa.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

3.3. Salida del modelo

El resultado final mostrará el horario definido mediante el tiempo de parada en cada estación y el tiempo de recorrido entre dos estaciones adyacentes. Dicho horario garantizará los niveles de puntualidad establecidos en las estaciones cabecera de la línea. Si un tren no sufre durante un recorrido ninguna incidencia o retraso, podrá emplear el colchón disponible en la siguiente interestación en realizar una conducción económica, la marcha nominal. Si por el contrario sufre algún contratiempo, éste se verá absorbido por el colchón disponible en la siguiente interestación.

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Transiciones entre pendientes	7
Figura 2. Consideración de la pendiente media.	7
Figura 3. Curvas de tracción. Esfuerzo e Intensidad	9
Figura 4. Consideración de la longitud del tren.	9
Figura 5. Representación gráfica del algoritmo de detección de reducción de velocidad en la interestación de Almendrales.....	14
Figura 6. Nube de puntos con marchas de regulación posibles en interestación típica y curva de Pareto.	20
Figura 7. Aplicación del criterio de dominación.	21
Figura 8. Aplicación del criterio de sensibilidad.....	22
Figura 9. Aplicación del criterio de distribución uniforme.....	22
Figura 10. Trayecto completo y curvas de Pareto en cada tramo.	27
Figura 11. Curva de Pareto como poligonal convexa.....	28

Publicaciones del Proyecto [ElecRail](#)

Monografías:

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

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