

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (ICAI)
Instituto de Investigación Tecnológica (IIT)

Diseño eficiente de servicios ferroviarios y control de la conducción en Alta Velocidad

Tesis para la obtención del grado de Doctor

Directores: Prof. Dra. Dña. Asunción Paloma Cucala García

Prof. Dr. D. Antonio Fernández Cardador

Autor: Ing. D. Carlos María Sicre Vara del Rey



Madrid 2013

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (ICAI)

Instituto de Investigación Tecnológica (IIT)

Diseño eficiente de servicios ferroviarios y control de la conducción en Alta Velocidad

Tesis para la obtención del grado de Doctor

Directores: Prof. Dra. Dña. Asunción Paloma Cucala García

Prof. Dr. D. Antonio Fernández Cardador

Autor: Ing. D. Carlos María Sicre Vara del Rey



Madrid 2013

**CONSTANCIA REGISTRAL DEL TRIBUNAL DEL ACTO
DE LA DEFENSA DE TESIS DOCTORAL**

TÍTULO: Diseño eficiente de servicios ferroviarios y control de la conducción en Alta Velocidad

AUTOR: Carlos María Sicre Vara del Rey

DIRECTORES: Asunción Paloma Cucala García y Antonio Fernández Cardador

TUTOR-PONENTE: -

DEPARTAMENTO: Instituto de Investigación Tecnológica

FACULTAD O ESCUELA: Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: **Firma:**

VOCAL: **Firma:**

VOCAL: **Firma:**

VOCAL: **Firma:**

SECRETARIO: **Firma:**

Fecha de lectura:

Calificación:

The aim of this abstract is to present a brief summary of the thesis "Efficient design of high speed railway services and real-time manual driving regulation". The original document has been written in Spanish, and the corresponding title is "Diseño eficiente de servicios ferroviarios y control de la conducción en *Alta Velocidad*".

Introduction

Many research lines are currently being developed to reduce energy consumption in High Speed railway services, among others infrastructure, rolling stock and operation. Energy efficiency on High Speed train services will be the main objective of this thesis, in particular in traffic operation. It will deal with the efficient design of manual drivings, the optimization of timetables and the regulation of the manual driving on real time.

Spanish High Speed lines are fully dedicated to the passenger transportation, what leads to a homogeneous traffic. Their capacity is still far from saturation, what allows a stable operation, being infrequent that the delay of a service is transmitted to the following. As well, driving is carried out manually by the drivers, who are responsible of the punctuality of the service. The operator companies have set a strict punctuality compromise, and in this type of lines the total cost of the ticket is refunded to the passenger if the delay is bigger than a certain value.

These characteristics make the Spanish High Speed railways network a perfect candidate to implement efficient drivings that fulfill the punctuality constraints. This thesis is focused on the three aspects previously mentioned: timetable optimization, design of efficient manual driving (ecodriving) and online manual driving regulation.

Timetable optimization

The timetable indicates the planned departure and arrival times from every station, as well as the stopping times at intermediate stations. This timetable assigns a commercial running time to each stretch, built up adding to the flat-out time a slack time called theoretical margin that is used to fulfill punctuality constraints in case of incidents.

The complexity in timetable design is associated to the distribution of the global slack time of a service among all its stretches in order to achieve as much robustness as possible. Historically, the slack time has been designed in a conservative way, prioritizing the punctuality over the efficiency, and allowing bigger slack times to stretches with arrivals at big stations.

This thesis proposes a model to distribute the overall slack time efficiently among all the stretches of a service, assigning more slack time to stretches with more potential of energy savings. The model will take into account the uncertainty associated to the delays by fuzzy theory, and it will be also considered fuzzy punctuality requirements.

Design of efficient manual driving (ecodriving)

The flat-out driving consists of driving at the maximum allowed speed with maximum accelerations and decelerations. This strategy produces premature arrivals, wasting the slack time at the stations instead of using it to achieve efficient drivings.

The final implementation of a manual driving is influenced by each driver, who can manipulate the traction/braking command continuously along the track, producing different drivings that will be characterized by a running time and energy consumption. This means that two drivings with the same running time may consume a different amount of energy, and similarly, two drivings that consume the same amount of energy may last different running times.

The optimal Pareto curve of a stretch consists of a set of manual drivings that, for each running time, consume the least amount of energy. This thesis proposes an automatic method of offline manual driving design that will be localized on the Pareto curve and will be easy to implement for the drivers.

Another important necessity is that the model must be flexible for the redesign of drivings needed to adapt to the continuous changes of commercial timetables. This thesis proposes a detailed simulation model of the dynamics of the high speed train as well as an adjusting and validating procedure for its utilization by the optimization algorithm.

Online manual driving regulation

During commercial services delays arise and it is necessary to make use of the slack time available in the timetable to recover it. In that case the eco-driving designed offline is not valid anymore and it is necessary to implement an on line regulation

algorithm capable of recovering the delay by means of a faster driving, but also in an efficient way.

Typically, the driver's reaction to significant delays is the "immediate" delay recovery, that is, to apply flat-out driving until total recovery of the delay, and then the return to the nominal driving. But this type of driving is not efficient from the energy point of view. The proposed algorithm regulates the nominal driving in real time monitoring continuously the delay. When the algorithm is triggered, it calculates an alternative efficient driving that recovers the accumulated delay, adapting the driving to the instantaneous characteristics of the service, and taking into account the uncertainty associated to manual driving. The proposed algorithm models the speed regulation command and the response time of the driver as fuzzy numbers.

Contributions

The objective consisting of the efficient design of manual drivings along high speed lines for a given running time has been fulfilled by an Evolutionary Algorithm based on a detailed simulation model of manual drivings. The original contributions related to this objective have been the following:

Simulation model with a high level of accuracy

It has been developed a simulation model for high speed manual drivings with a high level of accuracy in the calculation of running times and energy consumptions. This accuracy has been got by the adjustment and validation of the model with measurements registered on commercial services. The accuracy of the model is especially important, as high speed services have a strict punctuality compromise. In the literature, the algorithms based on simulation model do not achieve this level of accuracy, and in general have not been adjusted and validated.

The main characteristics of the simulation model are the following:

- Consideration of the train length, both with the influence when calculating the average grade and with the implication with the speed limits of the line.
- Traction and braking efficiency adjusted with real data.
- Model of the electrical losses along the catenary that allows the calculation of gross/net energy consumption at substations.
- Consideration of the tunnels that increase the running resistance inside them.
- Consideration of neutral sections and the braking effort applied along them in order to regenerate energy for the auxiliary equipment of the train.
- Model of the line by rounded curves between two different gradients. This characteristic, added to the consideration of the train length, allows the calculation of the instantaneous gradient as the weighted average of the different gradients where the train is located.
- Model of the layout of the line by straight lines, curves and clothoids in order to take into account the resistance due to the curves. This resistance is not significant

compared to the running resistance and the resistance due to the gradients, but increases the accuracy of the simulation model.

- Model of the manual driving that includes all the driving strategies utilized in the literature, and adapted to the real possibilities of the driver.

The simulation model has been adjusted and validated with real data to guarantee that the running times and energy consumptions are accurate. The validation got an accuracy of 99,25% in the calculation of running times, and around 99,65% in the calculation of energy consumption.

Model of the manual driving

Given the sensitivity of the results to the final implementation that the drivers carry out, it has been proposed a manual driving model easy to implement, especially appropriate for high speed lines, defined by a set of high level commands of holding speed without braking followed by a final coasting. This model can include all the rest of different driving strategies found in the literature so that the set of possible solutions is not reduced. It has been checked on real tests that this model is easy to understand and implement by the drivers.

Optimization model based on an Evolutionary Algorithm

It has been proposed an *Evolutionary Algorithm* to minimize the energy consumption in pantograph or substation of a manual driving for a given running time. It is designed with original cross and mutation functions that have been shown efficient for the generation of new drivings. The cross function generates drivings with scattered running times and energy consumptions, what is useful to explore the universe of solutions. Meanwhile, the mutation function generates drivings with similar running time and energy consumption, useful for a detailed local search of the universe.

The aim of the *Evolutionary Algorithm* is the determination of the manual driving whose running time is equal to the objective time and that consume the least amount of energy. The *Evolutionary Algorithm* evaluates the manual drivings with its Fitness Function that takes into account both the running time (penalizing the difference between the running time and the objective running time) and the energy consumption.

In order to accelerate the execution time of the optimization algorithm, before simulating each driving, it is estimated its running time, and if needed, the holding speeds are corrected, what makes the running time of the driving being similar to the objective running time, what allows to reduce the number of iterations of the algorithm. This function, together with cross and mutation functions, allow the execution time of the algorithm to be low enough for the purpose of this thesis.

Verification of the method with real measurements

It has been showed in this thesis for the first time, with real measurements and professional but not trained drivers, the potential energy savings associated to the optimal design of manual drivings.

The proposed method has been applied on real commercial services, developing manual driving designs for different stretches. It was checked that the manual driving model was easy to implement by the drivers, who did not need any previous training to precisely apply the efficient commands. This method has obvious advantages compared to others applied by the operators based on trial and error tests.

On the other hand, it has been confirmed the potential energy savings due to manual efficient driving. It has been measured average savings of 22,80% for the service Madrid-Guadalajara-Calatayud-Zaragoza, and a 19,13% for the service Zaragoza-Calatayud-Guadalajara-Madrid. The application of guided drivings not only has the advantage of reducing the energy consumption, but also of homogenize the driving pattern of the drivers, which is currently quite variable.

The next objective of the thesis, the energy optimization of commercial timetables with punctuality constraints, has been developed by an optimization model under uncertainty, whose aim is the minimization of the overall energy consumption of the service satisfying punctuality requirements at every station. The original contributions related to this objective have been the following:

Model for the joint design of ecodriving and timetable under uncertainty for high speed lines

It has been proposed a composed optimization model to obtain both the optimal timetable and the optimal driving along each stretch of the service. This approach tends to assign more slack times to those stretches with more energy saving potential, maximizing the total energy savings of the service.

Formulation and resolution of the timetable optimization problem with a fuzzy mathematical programming model

To model the uncertainty associated to the delays produced along the operation of a service, it has been proposed an original fuzzy programming model that considers the delay times as fuzzy numbers originated in the departure of every station of the service, what requires a fuzzy model of both the constraints of the problem and the objective function.

Model of the uncertainty associated to the delays by fuzzy numbers and expression of the punctuality requirements by measurements of necessity of punctual arrival at the station.

The fuzzy mathematical programming model proposed incorporates the punctuality constraints at the arrival of each station, considering the uncertainty of the delays, what allows fixing punctuality levels by measurements of necessity of punctuality at each station.

Model of the driver response when in delayed scenarios in the calculation of the energy consumption utilized in the objective function, and model of the uncertainty associated to this response.

The conservative behavioral response of the driver in case of delays is modeled, what causes increased energy consumption. This increase is modeled as a function dependent of the recovered delay time during the stretch. As well, the uncertainty associated to this response is modeled as a lineal function with a fuzzy slope.

In summary, the fuzzy optimization model minimizes the energy consumption of a delayed scenario taking into account the response of the driver to the delays. The commercial timetable optimization by the optimal distribution of slack times is a tool that, together with the utilization of manual energy efficient drivings, can achieve substantial energy savings in the operation of high speed services.

As a case example, it has been optimized the commercial timetable of the currently operated service 3113 between Madrid and Barcelona with stops at Calatayud, Zaragoza, Lérida and Tarragona, maintaining constant the total running time and the stopping times at each station, obtaining an overall energy saving of 6,67% for the base delayed scenario, what confirms the advantages of incorporating this design method to future services. This energy saving is only due to the optimal distribution of slack times among the stretches of the service, as the comparison has been done respect to the current timetable assuming efficient drivings along all the stretches.

The third objective of the thesis, the real time efficient regulation of the driving to guarantee the punctuality of the services, has been developed by an Evolutionary Algorithm with Fuzzy parameters. This algorithm calculates, when necessary, a new efficient driving with the same structure of the nominal driving that recovers the delay time fulfilling the required punctuality at the arrival station. The main original contributions related to this objective have been the following:

Real time optimization Algorithm based on an *Evolutionary Algorithm* with Fuzzy parameters.

It is proposed a method that shows the instantaneous delay of the train along a stretch, so that, in case it is bigger than a certain threshold, a new efficient driving is designed in real time by an *Evolutionary Algorithm* with Fuzzy parameters that takes into account the uncertainty associated to the manual driving, and where the punctuality requirement at the arrival of each station is expressed as a fuzzy necessity measurement. The efficiency of the Algorithm allows its utilization in real time, with execution times around 30s.

Uncertainty model associated to the manual execution of the commands.

The uncertainty related to the manual execution of the driving commands is modeled. It considers the uncertainty associated to the holding speeds and the command changing positions due to the driver's time response, that are modeled with fuzzy numbers. This fuzzy model is incorporated to the recalculation algorithm, imposing the punctuality requirement at the station as a fuzzy necessity measure.

Study and assessment of the efficiency compared to the typical immediate recover delay strategy in high speed lines.

The method proposed has been compared with the strategy of immediate recover delay, which is carried out frequently by the drivers. It consists of applying a flat-out driving until the total recovery of the delay and the latter application of the nominal driving. The proposed method gets substantial energy savings compared to this strategy.

There are proposed two case examples with real data along the stretch Calatayud-Zaragoza with the train Talgo-Bombardier S-102. In the first one it is analyzed a delay time of two minutes produced at the departure from Calatayud. With the proposed method it is achieved 7,77% of net energy saving in substation with respect to the immediate delay recovery strategy. In the second case example, it is analyzed a delay produced by a temporary speed limitation not considered in the offline design. With the proposed method it is achieved 6,71% of net energy saving compared to the immediate delay recovery strategy.

In summary, this thesis proposes a method to reduce the energy consumption of commercial high speed services from the design phase until the operation phase through three different models related to each other: an energy efficient driving design model, a model to optimize the timetable of commercial services with punctuality constraints, and finally a model of efficient regulation of the manual driving on real time.

With each of the three models, used independently, energy savings are got, but the main advantage is that they can be combined, obtaining a global method to improve the efficiency of the commercial high speed services operated with manual driving.

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DEL FERROCARRIL CONVENCIONAL A LA ALTA VELOCIDAD.....	1
1.2. MOTIVACIÓN Y ENFOQUE	7
1.3. OBJETIVOS.....	15
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	16
2. DISEÑO AUTOMÁTICO DE CONDUCCIONES EFICIENTES	19
2.1. INTRODUCCIÓN.....	19
2.1.1. Estrategias de conducción.....	21
2.1.2. Métodos de resolución.....	27
2.1.3. Resumen y marco de la tesis	36
2.2. MODELO DE SIMULACIÓN	39
2.2.1. Modelos de línea, tren y conducción manual	41
2.2.2. Funcionamiento del simulador.....	67
2.2.3. Ajuste y validación del simulador.....	76
2.2.4. Análisis del simulador.....	91
2.3. ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN.....	102
2.4. CASO EJEMPLO	111
2.5. RESUMEN, CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	117
3. OPTIMIZACIÓN DE HORARIOS BAJO INCERTIDUMBRE	121
3.1. INTRODUCCIÓN.....	121
3.2. MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE HORARIOS BAJO INCERTIDUMBRE	129
3.3. CASO EJEMPLO Y RESULTADOS	147
3.4. RESUMEN, CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	152
4. REGULACIÓN DE LA CONDUCCIÓN EN TIEMPO REAL.....	155
4.1. INTRODUCCIÓN.....	155
4.2. MODELO	159
4.3. ALGORITMO EVOLUTIVO CON PARÁMETROS BORROSOS.....	164
4.4. REGULADOR DE LA CONDUCCIÓN EN TIEMPO REAL	172
4.5. CASOS EJEMPLO	175
4.6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y APORTACIONES	181
5. CONCLUSIONES, APORTACIONES, PUBLICACIONES Y TRABAJO FUTURO	183
5.1. CONCLUSIONES Y APORTACIONES	183
5.2. PUBLICACIONES	189
5.3. TRABAJO FUTURO.....	190
6. REFERENCIAS	193

Lista de símbolos

Símbolo	Descripción
A	Coefficiente del término independiente de la resistencia al avance, N
a	Aceleración instantánea, m/s^2
a_s	Aceleración de servicio, m/s^2
B	Coefficiente del término de primer orden de la resistencia al avance, kg
C	Coefficiente del término de segundo orden de la resistencia al avance, $kg \cdot s^2/m$
C_i	Consumo energético asociado a la conducción nominal en el trayecto i
c_i	Tipo de curva del tramo i del trazado en planta de la línea
C_r	Parámetro de una clotoide
c_r	Coefficiente de inercias rotativas
$C_{r,i}$	Parámetro de curva del tramo i del trazado en planta de la línea
C_{total}	Consumo energético global de un servicio, MWh
\widetilde{C}_{total}	Consumo energético borroso global del servicio, MWh
E	Energía total consumida por una conducción, MWh
$E_{b,p}$	Energía bruta consumida en pantógrafo por una conducción, MWh
$e_{b,p}$	Energía consumida en pantógrafo hasta el instante actual, Ws
$E_{b,s}$	Energía bruta consumida en subestación por una conducción, MWh
$e_{b,s}$	Energía consumida en subestación hasta el instante actual, Ws
$E_{n,p}$	Energía neta consumida en pantógrafo por una conducción, MWh
$E_{n,s}$	Energía neta consumida en subestación por una conducción, MWh
$E_{r,p}$	Energía regenerada en pantógrafo por una conducción, MWh
$e_{r,p}$	Energía eléctrica regenerada en pantógrafo hasta el instante actual, Ws
$E_{r,s}$	Energía regenerada en subestación por una conducción, MWh
$e_{r,s}$	Energía eléctrica regenerada en subestación hasta el instante actual, Ws

Símbolo	Descripción
F	Esfuerzo de tracción/freno instantáneo, N
F_a	Fuerza de resistencia al avance instantánea, N
F_e	Esfuerzo de freno eléctrico instantáneo, N
F_{ext}	Sumatorio de las fuerzas externas que actúan sobre el tren, N
$F_{e,max@v}$	Esfuerzo máximo de freno eléctrico a la velocidad v , N
FF	Función objetivo o Fitness del Algoritmo Evolutivo
F_n	Esfuerzo de freno neumático instantáneo, N
$F_{n,max}$	Esfuerzo máximo de freno neumático, N
F_p	Fuerza de resistencia debida a la pendiente/rampa instantánea, N
F_r	Fuerza de resistencia debida al radio de curvatura instantáneo, N
F_t	Esfuerzo de tracción instantáneo, N
$F_{t,max@v}$	Esfuerzo máximo de tracción a la velocidad v , N
$f_{tun,i}$	Factor del túnel i de la línea
g	Aceleración de la gravedad en la superficie terrestre, m/s^2
h	Cota, m
I	Intensidad en catenaria, A
K_r	Parámetro de la resistencia debida al radio de curvatura, m
KV	Parámetro de acuerdo vertical entre dos pendientes adyacentes
KV_i	Parámetro de acuerdo vertical entre los tramos de pendiente i e $i + 1$ en la línea
L	Longitud del tren, m
m	Masa del tren, kg
M_c	Matriz de consignas que describe una conducción manual
m_c	Masa de la carga del tren, kg
m_i	Masa inercial del tren, kg
N	Número de consignas de una conducción
$N_{a,AE}$	Número de conducciones aleatorias en cada generación del Algoritmo Evolutivo
N_{areg}	Número de subestaciones de la línea
$N_{c,AE}$	Número de cruces por generación del Algoritmo Evolutivo
N_{curv}	Número de curvas de la línea
$N_{e,AE}$	Número de conducciones del grupo de elite en el Algoritmo Evolutivo
$N_{g,AE}$	Número máximo de generaciones del Algoritmo Evolutivo
$n_{g,AE}$	Número de generación del Algoritmo Evolutivo
$N_{h,AE}$	Número de hijos del grupo de elite en el Algoritmo Evolutivo
N_{lp}	Número límites de velocidad permanentes de la línea
N_{lt}	Número de límites de velocidad temporales de la línea
$N_{m,AE}$	Número de mutaciones por generación del Algoritmo Evolutivo
$N_{p,AE}$	Número de conducciones de la población en el Algoritmo Evolutivo
N_{pc}	Número de puntos de control de la línea
N_{pcat}	Número de tramos alimentados por diferente subestación de la línea

Símbolo	Descripción
N_{pend}	Número de pendientes de la línea
N_{tun}	Número de túneles de la línea
N_{zn}	Número de zonas neutras de la línea
P	Potencia activa en pantógrafo, W
p	Pendiente equivalente instantánea del tren, ‰
P_{aux}	Potencia nominal de los equipos auxiliares, W
p_{cabeza}	Pendiente instantánea de la cabeza del tren, ‰
P_{cat}	Potencia de pérdidas en catenaria, W
pc_i	Nombre del punto de control i de la línea
p_{cola}	Pendiente instantánea de la cola del tren, ‰
p_i	Pendiente del tramo de pendiente i de la línea
P_m	Potencia mecánica del motor, W
$P_{n,f}$	Potencia nominal de freno eléctrico del motor, W
$P_{n,t}$	Potencia nominal de tracción del motor, W
r	Radio de curvatura equivalente instantáneo del tren, m
r_{cabeza}	Radio de curvatura instantáneo de la cabeza del tren, m
r_{cola}	Radio de curvatura instantáneo de la cola del tren, m
s	Espacio, m
t	Tiempo, s
T_{AEB}	Tiempo de ejecución del Algoritmo Evolutivo con parámetros borrosos, s
T_d	Tiempo de retraso en la salida de estación de un trayecto, s
t_d	Tiempo de retraso instantáneo, s
$T_{d,max}$	Tiempo umbral de retraso admisible, s
$T_{d,parcial}$	Tiempo de tiempo umbral de retraso parcial recuperado, s
$t_{d,recuperado}$	Tiempo de retraso parcial recuperado, s
T_h	Tiempo de holgura o margen teórico en un trayecto, s
t_h	Tiempo de holgura o margen teórico en un punto determinado de un trayecto, s
$T_{h,total}$	Tiempo de holgura o margen teórico total de un servicio comercial, s
T_{ll}	Tiempo de llegada comercial a estación, s
T_{mr}	Tiempo de holgura o margen real de un trayecto, s
t_{mr}	Tiempo de holgura o margen real instantáneo, s
T_{obj}	Tiempo de recorrido objetivo de una conducción en un trayecto, s
T_p	Tiempo de parada comercial en estación, s
$\underline{T_p}$	Tiempo de parada mínimo en estación, s
t_{pc}	Tiempo de paso comercial por un punto concreto del trayecto, s
$T_{pc,i}$	Tiempo de paso comercial por el punto de control i de la línea, s
$T_{pct,i}$	Tiempo de paso de la marcha tendida por el punto de control i de la línea, s
T_r	Tiempo de recorrido de una conducción en un trayecto, s
$\underline{T_r}$	Tiempo de recorrido mínimo de un trayecto, s
$\overline{T_r}$	Tiempo de recorrido máximo de un trayecto, s
t_r	Tiempo de recorrido restante, s
$\underline{t_r}$	Tiempo de recorrido mínimo restante, s
T_{rc}	Tiempo de recorrido comercial de un trayecto, s

Símbolo	Descripción
t_{rc}	Tiempo de recorrido comercial restante, s
$T_{rc,total}$	Tiempo de recorrido comercial total de un servicio, s
T_s	Tiempo de salida comercial de estación, s
U	Tensión en catenaria, V
v	Velocidad, m/s
$V_{c,i}$	Velocidad de la consigna de conducción i , m/s
v_d	Velocidad de deriva, m/s
v_{Fe1}	Velocidad de inicio del tramo de esfuerzo de freno eléctrico constante, m/s
v_{Fe2}	Velocidad de inicio de esfuerzo de freno eléctrico a potencia constante, m/s
v_{Ft}	Velocidad de inicio de esfuerzo de tracción a potencia constante, m/s
$V_{lp,i}$	Velocidad del límite de velocidad permanente i de la línea, m/s
$V_{lt,i}$	Velocidad del límite de velocidad temporal i de la línea, m/s
v_r	Velocidad de remotor, m/s
$V_{reg,max}$	Velocidad máxima de regulación de velocidad, m/s
$V_{reg,min}$	Velocidad mínima de regulación de velocidad, m/s
W	Peso, N
w_c	Peso asociado al consumo energético en la función objetivo del Algoritmo Evolutivo
w_t	Peso asociado al tiempo de recorrido en la función objetivo del Algoritmo Evolutivo
$X_{areg,i}$	Posición de comienzo de alimentación de la subestación i de la línea, m
$X_{c,i}$	Posición inicial de la curva i de la línea, m
$X_{ci,i}$	Posición inicial de la consigna i de la conducción manual, m
$X_{cf,i}$	Posición final de la consigna i de la conducción, m
$X_{df,max}$	Posición máxima del comienzo del tramo de deriva final en el Algoritmo Evolutivo, m
$X_{df,min}$	Posición mínima del comienzo del tramo de deriva final en el Algoritmo Evolutivo, m
x_e	Porcentaje de freno eléctrico, %
X_{fin}	Posición final de un trayecto, m
X_{inicio}	Posición inicial de un trayecto, m
$X_{lp,i}$	Posición del límite de velocidad permanente i de la línea, m
$X_{lti,i}$	Posición inicial del límite de velocidad temporal i de la línea, m
$X_{ltf,i}$	Posición final del límite de velocidad temporal i de la línea, m
$X_{p,i}$	Posición inicial del tramo de pendiente i de la línea, m
$X_{pc,i}$	Posición del punto de control i de la línea, m
$X_{pcat,i}$	Posición de comienzo de alimentación de la subestación i de la línea, m
$X_{SE,i}$	Posición de la subestación eléctrica i de la línea, m
x_t	Porcentaje de tracción, %
$X_{tuni,i}$	Posición inicial del túnel i de la línea, m
$X_{tunf,i}$	Posición final del túnel i de la línea, m
$X_{zni,i}$	Posición inicial de la zona neutra i de la línea, m
$X_{znf,i}$	Posición final de la zona neutra i de la línea, m
\tilde{Z}	Objetivo borroso
α	Ángulo de pendiente/rampa, rad

Símbolo	Descripción
Δt	Paso de tiempo, ms
Δt_r	Periodo de registro de medidas embarcadas, ms
Δv_i	Soporte de la velocidad borrosa \hat{v}_i , km/h
Δt_i	Soporte del tiempo de reacción borroso \hat{t}_i , s
η_{areg}	Rendimiento de aprovechamiento de la energía regenerada, %
η_e	Rendimiento del freno eléctrico regenerativo, %
η_t	Rendimiento del equipo de tracción, %
$\eta_{areg,i}$	Aprovechamiento de la energía regenerada de la subestación i de la línea
μ_c	Peso del consumo energético en la función objetivo del Algoritmo Evolutivo
μ_t	Peso del tiempo de recorrido en la función objetivo del Algoritmo Evolutivo
ΣF	Sumatorio total de fuerzas que actúa sobre el tren, N
$\mu_{T_{d,i}}(x)$	Función de pertenencia del tiempo de retraso borroso

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente y dedicar el fruto del trabajo de estos años a tres personas. En primer lugar a mi madre, por haberme transmitido los valores del esfuerzo y la constancia en el estudio. En segundo lugar a mi padre, quien a través de siempre creativos problemas como el de los monos lanzando cocos en tiro parabólico desde una palmera, me transmitió su inquietud por conocer el mundo que nos rodea. Y en tercer lugar a Marga, mi mujer, que siempre supo ayudarme con su apoyo y admiración.

Me gustaría agradecer efusivamente a mis directores de tesis Paloma y Antonio por haberme dado el privilegio de trabajar con ellos en el Área de Sistemas Ferroviarios y por su valiosa guía durante todo este tiempo.

Gracias a todos los compañeros del Instituto de Investigación Tecnológica, especialmente a la reciente Doctora María Domínguez, compañera de cabina, trabajadora incansable a la que no para ni un descarrile ni un incendio. Te deseo lo mejor en tu nueva etapa.

Gracias al Profesor D. Masafumi Miyatake, principal responsable de mi enriquecedora estancia en Tokyo, y al Dr. D. Piotr Lukaszewicz, por sus siempre productivas visitas anuales.

Gracias a las empresas que han posibilitado el desarrollo de esta tesis; Talgo, Renfe, Caf, Bombardier, Adif y el Ministerio de Fomento, y a todos los maquinistas que participaron en las pruebas.

Por último, gracias al Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) y a la Universidad Pontificia Comillas.

1.1. DEL FERROCARRIL CONVENCIONAL A LA ALTA VELOCIDAD

En el principio era el ferrocarril convencional. Así como también “En el principio eran las especias”, frase con la que el escritor Stephan Zweig comienza su libro Magallanes, el hombre y su gesta (Zweig 1938), en el que describe el primer viaje en barco que circunvaló la tierra. Desde el inicio de la humanidad, el hombre ha tenido la imperiosa necesidad del transporte, ya sea de alimentos, de materiales o de personas.

La invención de la rueda cambió la manera en que el hombre transportaba tanto las mercancías como a sí mismo, y propició una de las invenciones que cambió el curso de la historia, el ferrocarril, que no ha parado de evolucionar hasta nuestros días.

La primera evidencia de algo parecido a lo que conocemos hoy en día como ferrocarril se encuentra en el istmo de Corinto y data del siglo VI a.C., donde se utilizaba una línea para transportar botes mediante plataformas empujadas por esclavos y guiadas por hendiduras excavadas en la piedra. Salvando apariciones puntuales como la anterior, no fue hasta la Alta Edad Media, a partir de 1550, cuando los ferrocarriles comenzaron a aparecer en Europa, donde comenzaron a utilizarse líneas de vía estrecha con raíles de madera para transportar el mineral en las minas.

En 1768 se emplea el hierro en la fabricación de los raíles por primera vez, al principio mediante un revestimiento de la misma madera, lo cual permitió la elaboración de aparatos de vía más complejos como lazos de final de línea o agujas para el

intercambio de raíles. Más adelante, con la invención del hierro forjado se superaron los problemas de los primeros carriles de hierro, que eran frágiles y cortos.

En 1790 se utiliza por primera vez un carril fabricado enteramente de acero en Reino Unido. Trece años más tarde se inaugura en el Sur de Londres la línea "Surrey Iron Railway", constituyendo el primer ferrocarril público tirado por caballos. Fue en 1857 cuando definitivamente se instaura el acero como el material de fabricación de los raíles.

La aparición en 1769 de la máquina de vapor de la mano de James Watt supuso un nuevo avance en la incipiente industria ferroviaria. No obstante, su peso y presiones de trabajo iniciales no eran adecuadas para su empleo en el ferrocarril, con lo que hubo que esperar hasta 1804, cuando Richard Trevithick presenta en Reino Unido la primera locomotora de vapor capaz de arrastrar un tren, prueba que acabó con los frágiles raíles de chapa de hierro que lo guiaban.

La primera locomotora de vapor que se empleó para el transporte público vino de la mano de George Stephenson en 1825. Bautizada como Locomotion, se utilizó en la línea que une las ciudades de Stockton y Darlington, al noreste de Inglaterra. Años más tarde sus éxitos le llevaron a crear la primera compañía fabricante de locomotoras de vapor, que fueron empleadas en líneas europeas y estadounidenses. Este desarrollo de las locomotoras de vapor hizo que las líneas de ferrocarril y locomotoras se extendieran por todo el mundo.

La evolución dio paso al empleo de trenes eléctricos; en 1838 Robert Davidson construyó un carruaje equipado por baterías capaz de alcanzar 6,4 km/h. Sin embargo, no es hasta 1883 cuando el primer tranvía con suministro eléctrico circula por la línea entre Portrush y Giant's Causeway, al norte de Irlanda, en el que se utiliza un tercer raíl para la alimentación eléctrica. El primer tren eléctrico en demostrarse factible nace de una exhibición en Berlín en 1879, de la mano de Werner Von Siemens (Rossenberg 1998). A partir de entonces, el crecimiento del ferrocarril eléctrico fue rápido. En 1885 se inauguró el primer servicio comercial en la línea alemana Meckenbeuren-Tettang, de apenas cuatro kilómetros de longitud. El empleo de electricidad para la alimentación de los motores comenzó siendo en corriente continua, y fue Austria el país que primero comenzó a utilizar corriente alterna en 1904.

La clave para el rápido crecimiento del ferrocarril eléctrico fue el desarrollo eficiente y continuo de la generación eléctrica. Más adelante, desde los años ochenta, la electrónica de potencia ejerció un gran impacto tanto en la infraestructura ferroviaria como en el material rodante, que ha dado lugar por ejemplo a la posibilidad del uso eficiente del frenado regenerativo producido durante los procesos de frenado. Una de las ventajas principales del ferrocarril es el uso de la energía eléctrica, lo que permite el empleo de muy diferentes fuentes de energía primaria (Koseki 2010).

Los trenes de vapor y los trenes eléctricos convivieron durante algunos años. No obstante, las necesidades de mantenimiento de los primeros y el aumento de los costes de personal posteriores a la segunda Guerra Mundial provocaron la paulatina

sustitución de los trenes de vapor por trenes dotados con motores de combustión interna, los cuales habían alcanzado un nivel de desarrollo elevado tras la Guerra, logrando al mismo tiempo disminuir el peso de las locomotoras y aumentar la potencia.

La popularidad del ferrocarril se frenó con la producción a gran escala de autovías tras la Guerra, lo que aumentaba el atractivo del coche para trayectos cortos. Además, los aviones ganaban la partida para trayectos de larga distancia en una sociedad con mayores niveles de renta per cápita. No obstante, la crisis del petróleo de 1973 comenzó a cambiar esta tendencia dada la mayor eficiencia del transporte ferroviario frente al transporte por carretera (García 2007). Otro acontecimiento fundamental cambiaría el modo en que se entiende el transporte ferroviario de viajeros y popularizaría enormemente este medio de transporte: la aparición del tren de Alta Velocidad.

El tren de Alta Velocidad nace en Japón el 1 de octubre de 1964, uniendo las ciudades de Tokyo y Osaka (Figura 1-1) con una velocidad máxima de 210 km/h y motores de corriente continua (DC) en cada uno de sus 16 coches. Desde entonces, los operadores ferroviarios de todo el mundo vieron en el sector de la Alta Velocidad una oportunidad única para que el transporte de viajeros por ferrocarril volviera a competir con el automóvil privado y el avión (Campos, De Rus, and Barrón 2009).

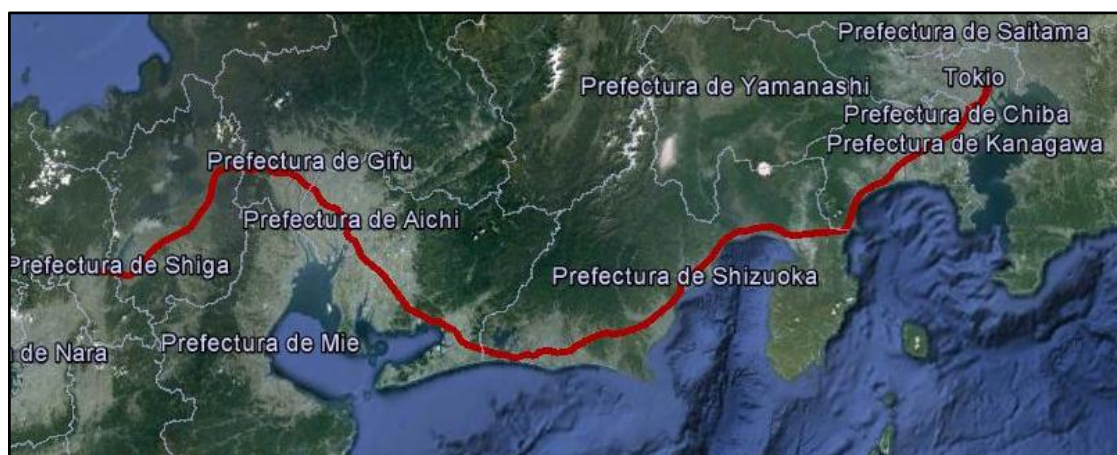


Figura 1-1. Primera línea ferroviaria de *Alta Velocidad*, línea Tokyo – Osaka, Japón, 1964.

En la Directiva 96/48 de la Unión Europea relativa a la interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo de Alta Velocidad (Interoperability of the Trans-European High Speed Rail System) celebrada en Bruselas el 23 de julio de 1996 se define la infraestructura ferroviaria de Alta Velocidad como aquella que incluye alguna de las siguientes características:

- Líneas ferroviarias diseñadas y construidas expresamente para trenes capaces de desarrollar velocidades iguales o superiores a 250 km/h.
- Líneas ferroviarias convencionales, preparadas y reequipadas para trenes cuya velocidad se sitúe en torno a 200 km/h.

- Líneas ferroviarias convencionales preparadas para una mayor velocidad, pero que, por sus especiales circunstancias topográficas o por encontrarse en áreas próximas a núcleos urbanos, su velocidad se reduce.

Las dos principales ventajas del transporte ferroviario de Alta Velocidad fueron a la vez los principales motivos por lo que se popularizaron tanto.

Por un lado, el aumento de capacidad que admiten las líneas de Alta Velocidad. El aumento de la velocidad de los trenes y la mejora de la señalización han permitido disminuir los intervalos de tiempo mínimos entre trenes sin comprometer la seguridad, posibilitando el aumento del número de viajeros transportados por unidad de tiempo.

Por otro, la disminución del tiempo de recorrido ha permitido a la Alta Velocidad competir con otros modos de transporte, principalmente el avión, el vehículo particular y el tren convencional. El tiempo de recorrido se ha situado por encima del precio como factor clave a la hora de decidir medio de transporte. Así, por ejemplo, tras la inauguración de la primera línea de Alta Velocidad española en el tramo Madrid-Sevilla coincidiendo con la Expo92 se reducía en 4 horas el tiempo de viaje respecto al obtenido en línea convencional, estableciéndolo en 2 horas y 32 minutos. El transporte por avión y por carretera perdieron en este tramo un 27% y un 8% respectivamente, cediéndoselo al transporte ferroviario de *Alta Velocidad* (European Commission 1996).

Estas dos ventajas provocaron una rápida expansión de las infraestructuras ferroviarias de Alta Velocidad en el mundo, estando ya presentes en 15 países, y un crecimiento constante del número de viajeros transportados, con una media de 50 y 100 millones anuales en Europa y Japón respectivamente (Campos, De Rus, and Barrón 2009).

Otras ventajas también importantes son el bajo consumo eléctrico por viajero y kilómetro en comparación con otros modos de transporte sustitutivos (García 2007) y el reducido número de víctimas por millón de pasajeros (Campos, De Rus, and Barrón 2009).

Por otro lado, de todos los costes operativos del material rodante que influyen en un servicio ferroviario de Alta Velocidad, cuatro son los principales, estando los tres primeros muy condicionados por la tecnología de los trenes (Campos, De Rus, and Barrón 2009):

- Enganche y operación de los trenes, principalmente costes laborales de la tripulación y del personal encargado de gestionar la circulación.
- Mantenimiento del *material rodante* y del resto de equipos auxiliares.
- Costes energéticos, que pueden calcularse a partir del consumo medio por kilómetro, el cual varía según el tipo de tren, y la distancia recorrida anualmente.
- Costes administrativos asociados a la comercialización de los servicios.

En relación al tercer coste indicado anteriormente, existen estudios que critican el transporte ferroviario en Alta Velocidad dado el alto coste energético que requiere el aumento de la velocidad de operación (Levinson et al. 1997), (Kemp 2004). No obstante, otros estudios alegan que además de los criterios puramente económicos a la hora de evaluar esta tecnología, se deben tener en cuenta otros como la influencia de la rapidez del transporte en una economía madura (García 2007).

En España, los costes asociados a la energía eléctrica se pagan al administrador de la infraestructura en lugar de al distribuidor, como pasa por ejemplo en Alemania. Además, otros países utilizan fuentes de energía más baratas como la nuclear (Francia). Estos dos factores hacen que en España los costes asociados a la energía consumida por los servicios ferroviarios se encarezcan en torno a un 5% respecto a los países citados.

El transporte ferroviario en *Alta Velocidad* no implica ventajas únicamente; como contrapartida, las inversiones que estos sistemas requieren para un país son de tal cuantía que si no se planifican con minuciosidad pueden comprometer seriamente la política de transporte durante décadas (Campos, De Rus, and Barrón 2009).

Estos elevados costes de inversión son, en gran medida, consecuencia de las necesidades intrínsecas de este tipo de infraestructuras, no sólo durante la fase inicial, sino también durante la operación y mantenimiento, lo cual supone una gran diferencia respecto al ferrocarril convencional; los perfiles de las líneas de *Alta Velocidad* son suaves y con pendientes limitadas a 35‰ para disminuir la resistencia debida a la pendiente, posibilitar que los motores de los trenes sean capaces de mantener velocidades altas en rampa (pendiente ascendente) sin sobredimensionarlos, y garantizar un coeficiente de adherencia adecuado incluso en condiciones desfavorables como la presencia de lluvia, hojas o nieve en los raíles. Además, para garantizar el confort al viajero en pasos por curva son necesarios radios de curvatura elevados para mantener la aceleración no compensada en niveles aceptables. Estos motivos condicionan la rigidez de los trazados de las líneas de Alta Velocidad, donde son frecuentes los túneles, puentes, terraplenes, desmontes y tramos de vía rectos, todo lo cual incrementa considerablemente el coste por kilómetro de línea construido.

Por otro lado, la *Alta Velocidad* tiene como consecuencia directa mayores vibraciones y daños a las vías, lo que requiere un coste de mantenimiento elevado. También producen mayor ruido que el ferrocarril convencional, considerado como el principal impacto ambiental. También sufren una mayor resistencia al avance, lo que ha requerido diseños de trenes optimizados para hacerlos más aerodinámicos, encareciendo también el coste de los mismos.

Todas estas desventajas han propiciado el avance de la tecnología, que se ha manifestado en diferentes aspectos como en el aumento de la distancia entre ejes y la situación de los bogies entre coche y coche para dar mayor estabilidad, reducir el peso y el pivoteo en las curvas, el uso de materiales más ligeros y resistentes.

En cuanto a la señalización, surgió la necesidad de sustituir las señales en vía por información en cabina, ya que a altas velocidades el maquinista tiene dificultad para verlas. En Europa nació el sistema ERTMS (European Railway Traffic Management System), tanto en nivel 1 como en nivel 2, cuyo objetivo es unificar los 20 sistemas de señalización operativos en Europa y formar un sistema europeo único de gestión del tráfico ferroviario.

El transporte ferroviario en *Alta Velocidad* es un sistema en plena expansión en la actualidad. Países como China, Japón, Francia, Alemania y España llevan la delantera, pero poco a poco se van incorporando otros como Arabia Saudí y Estados Unidos. Recientemente China se ha convertido en el país con más kilómetros de vía en operación y España ha inaugurado el tramo Barcelona-Figueras, logrando conectarse a la red francesa a través de ancho UIC.

Japón lleva la delantera en innovación; proyectos como el Maglev, de transporte ferroviario por levitación magnética tiene actualmente una línea de pruebas en Japón, que pretende unir las ciudades de Tokyo y Osaka en menos de una hora a una velocidad máxima de 600 km/h (Soujima and Isoura 2012).

Por otro lado, existen numerosos proyectos en desarrollo, entre los cuales cabe destacar el proyecto HARAMAIN (HHR, Haramain High Speed Rail) de una línea de Alta Velocidad de 444 km entre las ciudades de La Meca y Medina, con paradas intermedias en Jeddah y KAEC, consistente en el diseño, construcción, operación y mantenimiento de la línea en régimen BOT (build, operate and transfer) para la Organización de Ferrocarriles Saudí (SRO), cuya demanda media ha sido estimada en 160.000 viajeros al día, doble vía de 1435 mm, electrificación a 25 kV y 60 Hz y ERTMS nivel 2. La fase 2 del proyecto, correspondiente a la construcción de la superestructura (rieles, traviesas, piezas de sujeción, catenaria, aparatos de electrificación y señalización, instalaciones de comunicaciones, seguridad, bloqueo, etc.), puesta en servicio de la línea, suministro del material rodante y operación y mantenimiento durante 12 años ha sido adjudicada al consorcio español Al Shoula, formado por dos empresas saudíes y doce españolas.

Actualmente, las velocidades máximas de los sistemas ferroviarios de *Alta Velocidad* se sitúan en torno a los 300 km/h, como se puede observar en los perfiles de velocidad de los tres servicios comerciales mostrados en la Figura 1-2, la Figura 1-3 y la Figura 1-4 para China, España y Japón respectivamente.

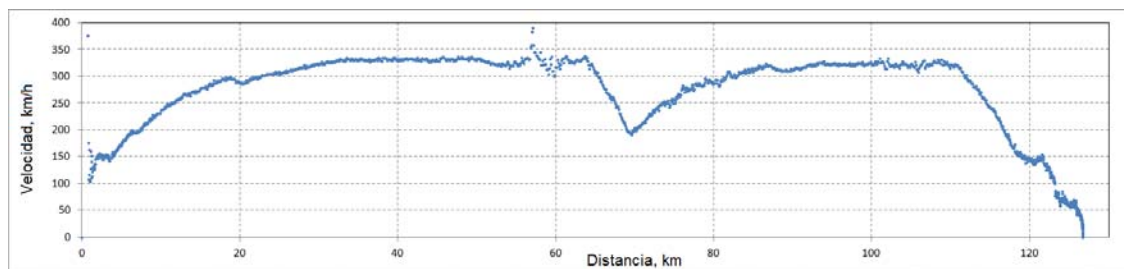


Figura 1-2. Perfil de velocidad del tren de *Alta Velocidad* chino CRH (China Railway High-speed) entre Beijing y Tianjin, 2 de septiembre de 2010.

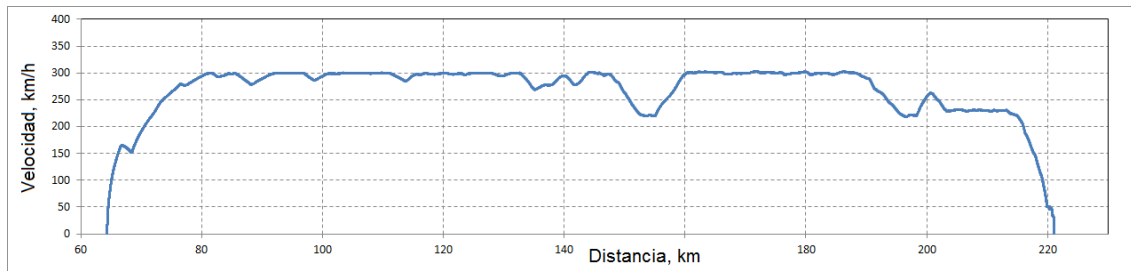


Figura 1-3. Perfil de velocidad del tren de *Alta Velocidad* español Talgo-Bombardier S-102 entre Guadalajara y Calatayud, 12 de noviembre de 2009.

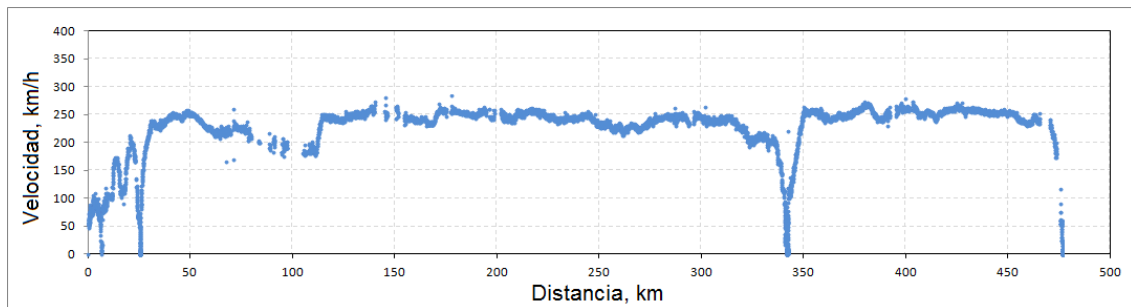


Figura 1-4. Perfil de velocidad del tren de *Alta Velocidad* Shinkansen entre Tokyo y Osaka, 3 de agosto de 2012.

Son múltiples las líneas de investigación abiertas referentes a los sistemas ferroviarios de Alta Velocidad, pudiéndose clasificar en tres grandes grupos; infraestructura, material rodante y operativas. Se citan a continuación algunas de las ramas de cada una de ellas:

Infraestructura: electrificación, señalización, trazado de la vía, mantenimiento, acumuladores fijos.

Material rodante: nuevos materiales, aumento de la capacidad de los trenes, guiado de los coches, sistemas de tracción, acumuladores embarcados.

Operativas: diseño de horarios, conducción automática eficiente, conducción manual eficiente, resolución de conflictos, regulación en tiempo real, confort.

Muchas de las líneas de investigación citadas anteriormente tienen como objetivo el ahorro energético y la reducción de emisiones. La eficiencia energética de los servicios ferroviarios de Alta Velocidad es el objetivo principal de esta tesis, que se enmarcará dentro de la línea de investigación relacionada con la operación, y en concreto con el diseño de conducciones manuales eficientes, el diseño óptimo de horarios y la regulación de la conducción en tiempo real.

1.2. MOTIVACIÓN Y ENFOQUE

Aún hoy en día hay discusión acerca del consumo energético del tren de *Alta Velocidad*. Los detractores alegan que es un gran consumidor de energía debido a las velocidades a las que circula y la potencia de los motores del mismo. Sin embargo, estas tesis son rechazadas con argumentos fundados, analizando no sólo la potencia

de los motores del tren sino el tipo de líneas y servicios que operan estos trenes (García 2007). Así, en (Koseki 2010) se afirma que el tren de *Alta Velocidad* es en la actualidad uno de los modos de transporte más eficientes, llegando a superar incluso al tren convencional, ya que a pesar de estar dotados de una mayor potencia, la reducción del tiempo de recorrido en los trayectos, el bajo número de paradas en comparación con los servicios ferroviarios convencionales y los límites de velocidad altos y constantes contribuyen decisivamente a superar la eficiencia de los servicios ferroviarios convencionales (García 2007).

La moderna red de Alta Velocidad española juega un papel fundamental en el transporte de personas en España, siendo una de las más extensas junto con la china y la japonesa. Además, un rasgo diferenciador con respecto a otras redes de *Alta Velocidad* europeas como Alemania, Italia y Holanda, que han adoptado un modelo de explotación de tráfico mixto entre transporte de mercancías y pasajeros (D'Ariano and Albrecht 2006), es que se caracteriza por la dedicación exclusiva al transporte de viajeros. Trenes como el Talgo-Bombardier de la serie 102, el Alstom de la serie 100 o el Siemens de la 103 están diseñados para circular a 300 km/h, actualmente la velocidad máxima permitida de la red por criterios de señalización. Otros como el ATPRD serie 120 de Caf alcanzan los 250 km/h.

El hecho de que los servicios de *Alta Velocidad* no sean mezclados con tráficos más lentos, unido a que la capacidad actual de las líneas está aún lejos de la saturación, hace que la explotación de las mallas sea muy estable, siendo infrecuente que los retrasos de un servicio se transmitan a los siguientes. De hecho, la mayoría de las incidencias normales producidas durante un servicio (retraso a la salida de estación, distracción del maquinista, etc.) pueden ser absorbidas con rapidez gracias a la holgura de tiempo de que están dotados los servicios comerciales sin modificar el normal desarrollo de los servicios adyacentes.

Otra característica fundamental en la red de *Alta Velocidad* española es que la conducción se realiza manualmente, siendo responsabilidad del maquinista el cumplimiento de las restricciones operativas y de seguridad durante un servicio comercial, lo cual llevará a cabo principalmente mediante la manipulación continua del mando de tracción/freno del tren. No sucede lo mismo en la mayoría de las redes metropolitanas modernas y algunas líneas de cercanías, donde la conducción se realiza de manera automática mediante un sistema de ATO (Automatic Train Operation), quedando reducida la actuación del maquinista en condiciones normales de circulación al arranque, apertura y cierre de puertas. Aunque estos sistemas de conducción automática no están disponibles aún en trenes de Alta Velocidad, algunos de ellos disponen de sistemas de ayuda a la conducción, por ejemplo los que monitorizan la curva de velocidad permitida por el ATP (Automatic Train Protection) y permiten realizar regulaciones de velocidad, (Poré 2010). No obstante, a diferencia de los ATO de líneas metropolitanas, estos sistemas no están dotados de funciones de seguridad que les permitan asumir la función del conductor, y no permiten la ejecución automática de consignas de deriva (esfuerzo de tracción nulo).

Las características anteriores hacen de la Red de Alta Velocidad española una candidata idónea para la implantación de conducciones manuales eficientes que

cumplan con los requisitos de puntualidad necesarios. Las motivaciones de la presente tesis están en relación directa con las tres grandes necesidades en el diseño y operación de los servicios comerciales en la red Alta Velocidad española:

- Diseño de horarios de los servicios comerciales.
- Diseño de conducciones manuales.
- Regulación de la conducción en tiempo real.

Diseño de horarios de los servicios comerciales

Un servicio comercial está compuesto por n estaciones y $n - 1$ trayectos, considerando un trayecto como el recorrido entre dos estaciones consecutivas con parada comercial, como muestra la Figura 1-5.

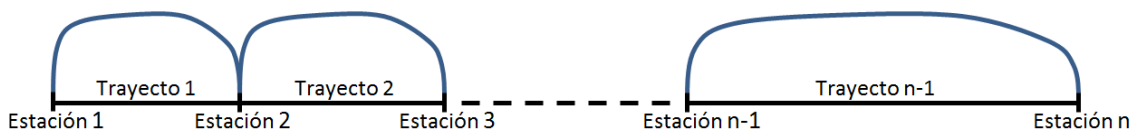


Figura 1-5. Estructura de un servicio comercial formado por n estaciones y $n - 1$ trayectos ($n \geq 2$).

El horario comercial indica los tiempos de salida planificados desde cada una de las n estaciones, además de los tiempos de parada comerciales en las estaciones intermedias. Este horario lleva implícito un tiempo de recorrido comercial para cada trayecto, que se dimensiona añadiendo al tiempo de recorrido mínimo un tiempo adicional denominado tiempo de holgura o margen teórico con el fin de garantizar la puntualidad del servicio en caso de incidencias.

La conducción de tiempo de recorrido mínimo en cada trayecto se obtiene realizando una conducción a marcha tendida a lo largo del mismo, es decir, a la velocidad máxima permitida en cada punto y realizando las aceleraciones y frenados al máximo porcentaje de tracción y freno respectivamente, compatibles con el confort de la marcha. La conducción a marcha tendida será en general la de máximo consumo energético, de tal manera que, cuanto mayor sea el tiempo de holgura teórico asignado a un trayecto, mayor será el potencial de ahorro energético alcanzable mediante una conducción eficiente.

La complejidad del diseño de un horario comercial reside en el dimensionamiento de la holgura de tiempo de cada trayecto del servicio de manera que se consiga la mayor robustez del mismo ante retrasos y la menor reducción de la capacidad de la red donde opere dicho servicio. Históricamente, este dimensionamiento se ha realizado atendiendo al código UIC 451-1, que asigna a cada tiempo de holgura un porcentaje asociado al tiempo mínimo de cada trayecto, otro asociado a la longitud del mismo y por último una cantidad variable asociada al requisito de puntualidad en la estación de destino. Este código hace que en general las operadoras dimensionen las holguras de tiempo de forma conservadora, de forma que se sobredimensionan los tiempos de holgura en trayectos con estación de destino en grandes ciudades como Madrid, Barcelona o Sevilla donde hay mayor tráfico de viajeros, y en cambio otros trayectos

con paradas en estaciones menos transitadas no gocen de apenas holgura de tiempo con la que poder realizar una conducción eficiente. Como ejemplo, el trayecto Calatayud-Guadalajara del servicio 3393 disponía en 2012 de un tiempo de holgura de 0:01:52, un 5,05% del tiempo de recorrido comercial, mientras que el trayecto Guadalajara-Madrid, que es el último del servicio, disponía de 0:11:43, un 37,8% del tiempo de recorrido comercial (Tabla 2-13).

Esta carencia de criterios de eficiencia energética asociados al diseño de horarios comerciales de los servicios de *Alta Velocidad* supone la primera motivación de la presente tesis, donde se propondrá un método de diseño de horarios que tenga en cuenta tanto la eficiencia global del servicio como el nivel de puntualidad requerido en cada una de las paradas del mismo. Este objetivo es equivalente a distribuir el tiempo de holgura total del servicio entre cada uno de sus trayectos, asignando mayores holguras de tiempo a aquellos con mayor potencial de ahorro energético. Además, es necesario incorporar al modelo la incertidumbre asociada a las incidencias en la línea. Por tanto, en el diseño de horarios se incorporará la incertidumbre en los retrasos mediante conjuntos borrosos (Zadeh 1965) y se impondrán igualmente requisitos de puntualidad borrosos.

Diseño eficiente de la conducción manual

Esta priorización en el diseño actual de los horarios de la puntualidad sobre la eficiencia energética se ha trasladado también a la propia conducción manual realizada por los maquinistas, cuyo desempeño se mide únicamente en términos de puntualidad, de manera que su patrón normal de conducción se asemeja mucho a la conducción a marcha tendida, lo que provoca la llegada prematura a las estaciones cuando no se han producido retrasos, desperdiciando la holgura de tiempo del trayecto detenidos en las estaciones. Esto provoca que los servicios ferroviarios de la Alta Velocidad española tengan un alto nivel de puntualidad, pero una eficiencia lejos de la óptima, que podría ser incrementada sin perjudicar los niveles de puntualidad si se empleara la holgura de tiempo disponible en cada trayecto en conducir de forma eficiente.

En los ensayos de conducción en servicios comerciales realizados como parte de los trabajos de esta tesis, se comprobó que un reducido porcentaje de maquinistas adoptan criterios de conducción eficiente basados en su propia experiencia, lo que dista de ser sistemático y óptimo, ya que ni siquiera disponen de contadores de energía en cabina con los que comprobar el desempeño.

La implementación de una conducción manual está sometida al criterio de cada maquinista, que puede variar de forma continua el regulador o mando de esfuerzo de tracción/freno del motor, dando lugar a conducciones diferentes, que estarán caracterizadas por un tiempo de recorrido y un consumo energético. Esto significa que dos conducciones con el mismo tiempo de recorrido podrán diferenciarse sensiblemente en la energía consumida por cada una de ellas, que dependerá únicamente de la forma de conducir a lo largo del trayecto. Se muestra en el enlace http://www.youtube.com/watch?v=xAlxKnzeUik&feature=player_embedded un video explicativo de la conducción manual de un tren de *Alta Velocidad* de la serie 103.

La Figura 1-6 muestra los resultados de tiempo de recorrido y consumo energético correspondiente a 50.000 conducciones diferentes a lo largo del trayecto Madrid-Guadalajara, simuladas mediante el modelo de simulación ajustado y validado con medidas reales que se presentará en el capítulo segundo de la tesis. La Figura 1-7 muestra un detalle de la misma gráfica alrededor del tiempo de recorrido comercial.

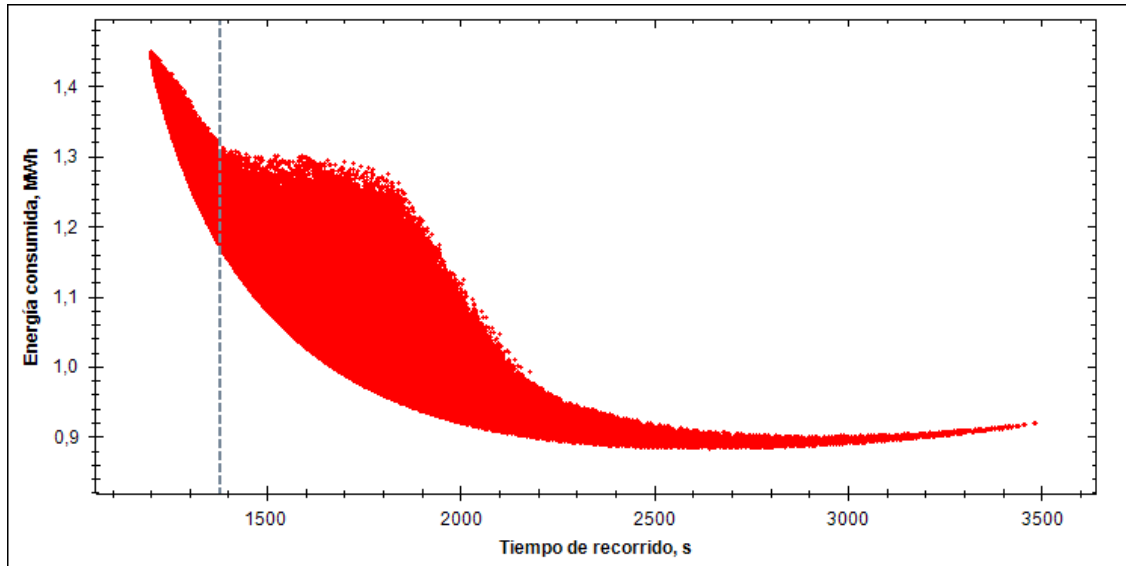


Figura 1-6. Tiempo de recorrido y consumo energético de 50.000 conducciones en el trayecto Madrid-Guadalajara con el Talgo-Bombardier S-102.

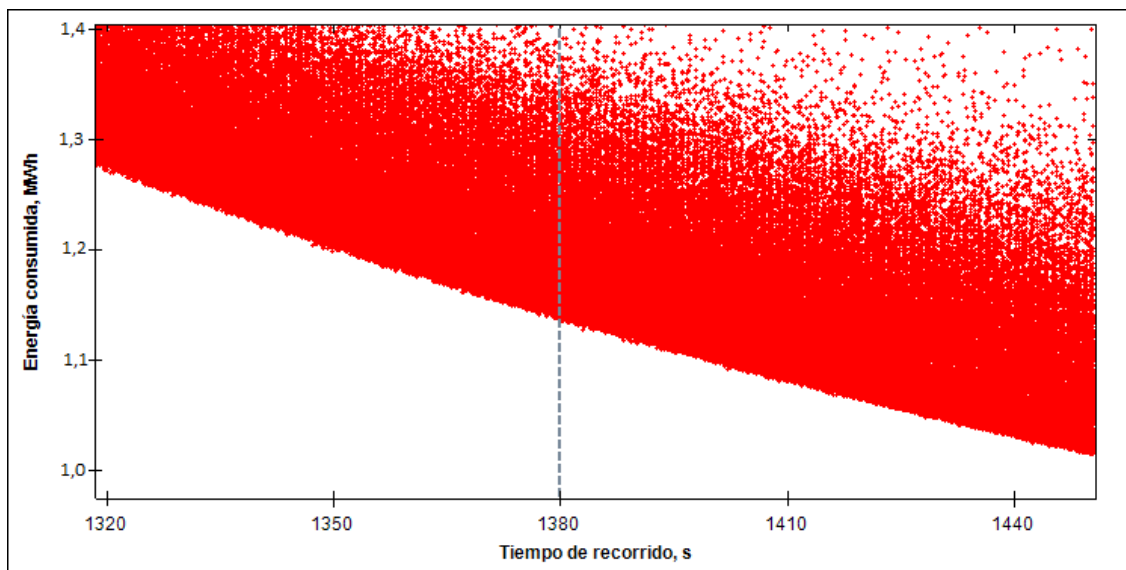


Figura 1-7. Detalle de tiempo de recorrido y consumo energético de 50.000 conducciones en el trayecto Madrid-Guadalajara con el Talgo-Bombardier S-102 alrededor del tiempo de recorrido comercial.

Según los resultados obtenidos con el modelo de simulación, para el tiempo de recorrido comercial de este trayecto (1380 s) la diferencia de consumo energético entre la conducción óptima y otra conducción puede llegar a ser del 12%. Por otro lado, la diferencia de consumo energético entre la conducción a marcha tendida, con un tiempo de recorrido de 0:20:00 y la conducción óptima para el tiempo de recorrido comercial es de casi un 24%.

La curva óptima de Pareto de un trayecto es el conjunto de conducciones manuales que para un tiempo de recorrido concreto consumen la mínima energía, es decir, la curva de Pareto está formada por todas aquellas conducciones que para su tiempo de recorrido tienen un consumo energético óptimo. La Figura 1-8 muestra la curva de Pareto del trayecto Madrid-Guadalajara con el tren Talgo-Bombardier S-102, donde el punto superior izquierdo indica la conducción a marcha tendida, relacionada con el tiempo mínimo de recorrido.

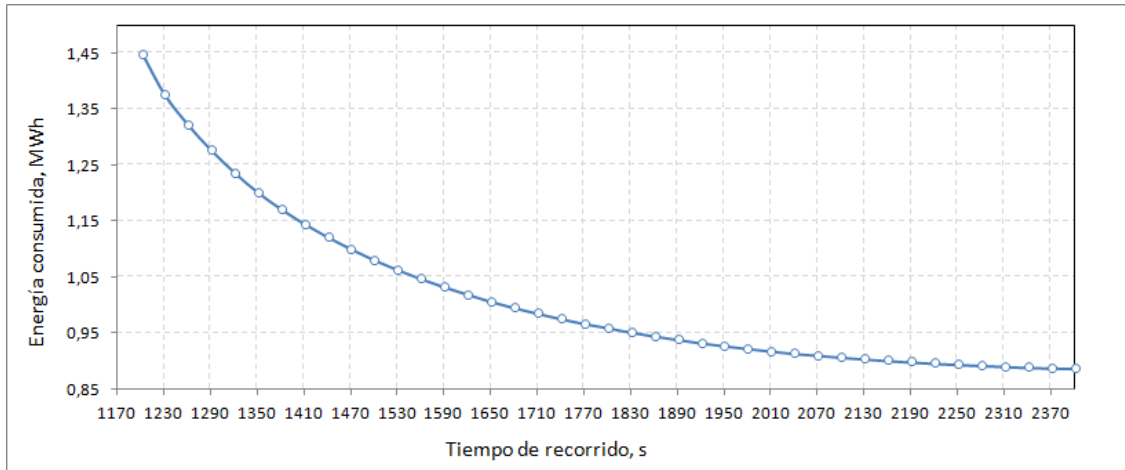


Figura 1-8. Curva de Pareto tiempo de recorrido - consumo energético en el trayecto Madrid-Guadalajara con el Talgo-Bombardier S-102.

Desde el punto correspondiente a la marcha tendida, a medida que aumenta el tiempo de recorrido disminuye el consumo energético de la conducción óptima situada en la curva de Pareto hasta un punto en el que un aumento de tiempo adicional ya produce un ahorro adicional, debido al consumo de los equipos auxiliares del tren (Figura 1-9).

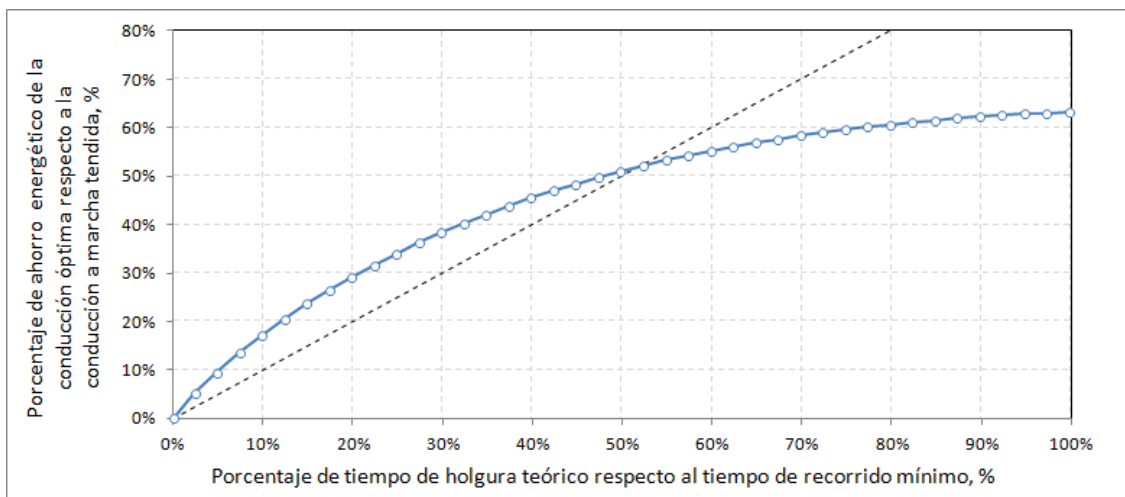


Figura 1-9. Ahorro energético de la conducción óptima según el tiempo de holgura teórico en el trayecto Madrid-Guadalajara con el Talgo-Bombardier S-102.

No obstante, los servicios comerciales suelen tener tiempos de holgura menores al 20% del tiempo de recorrido comercial, de manera que se trabaja siempre en la zona izquierda de la curva de Pareto. Siguiendo con el ejemplo del trayecto Madrid-

Guadalajara, cuyo tiempo de recorrido comercial vigente en casi todos sus servicios es de 23 minutos, su tiempo de holgura representa un 17,33% del tiempo de recorrido comercial del trayecto.

Existe por tanto la necesidad de sistematizar la conducción manual de los maquinistas con el objetivo de que sus conducciones sean lo más eficientes posibles cumpliendo con el tiempo de recorrido comercial, para lo cual se propondrá un método automático de diseño offline de conducciones manuales eficientes, que estarán localizadas en la curva de Pareto del trayecto y serán de fácil implementación para los maquinistas.

Además, es necesario disponer de un modelo de diseño eficaz, fiable y flexible para la actualización de las conducciones ante los frecuentes cambios de horario comercial. En esta tesis se propone un modelo de simulación detallado de la marcha del tren de Alta Velocidad y un procedimiento de ajuste y validación del simulador para su posterior empleo por parte del algoritmo de optimización de la conducción.

Regulación en tiempo real de la conducción manual

Durante el desarrollo de un servicio comercial, el maquinista dispone de un documento en el que se indica, entre otras cosas, el horario del servicio completo, los tiempos de parada en estaciones intermedias y la hora de paso por una serie de puntos de cada trayecto denominados puntos de control. Este documento, llamado Hoja de Ruta del servicio, es utilizado principalmente por el maquinista para controlar la puntualidad del mismo, Figura 1-10.


<div style="text-align: center;"> Hoja de Ruta MALLAS </div> <div style="text-align: right;">  </div> <div style="text-align: right; margin-top: 5px;"> Documento válido para el día: 25 Nov 09 </div>											
Tren: 03063 AVE Origen: PTA. DE ATOCHA Destino: BARNA-SANTS											
C	Tipo de	Sit	Vel	Dependencia	A	Para	P	Horas	Para	Tiempo	C.
A	bloqueo	Klm	max	Precaución	S	Com	e	Sal-Pas	Tec	Conc	Rad
T					F		f				
		419.9		VALLMANYA.....	1			8:22		5.0	
		430.3		MONTAGUT-A.V.....	1			8:24.3		2.3	
		434.6		BIF LES TORRES.....	1			8:25.3		1.0	
	' BSL '	439.9	300	EL SEGRE.....	1			8:27		1.3	(G)
		449.0		BIF ARTESA LLEID.....	1			8:29		2.0	
		451.8		BIF CBDOR PUIGVE.....	1			8:30.3		1.3	
		456.6		LES BORGES-A.V.....	1			8:32		1.3	
		482.6		KM. 482,6.....	1			8:38		6.0	
		488.9		L'ESPLUGA F-A.V.....	1			8:39		1.0	
		509.3		ALCOVER-A.V.....	1			8:45		6.0	
		520.9		CAMP TARRAGONA.....	1			8:48		3.0	
		533.2		BIF CBDOR RODA.....	1			8:51		3.0	
		534.7		POBLA MONTORNES.....	1			8:51.3		0.3	
		552.7		L'ARBOÇ-A.V.....	1			8:55.3		4.0	
		565.7		VILAFRANCA-A.V.....	1			8:58.3		3.0	
		579.6		GELIDA-A.V.....	1			9:02		3.3	
		583.6		KM. 583,639.....	1			9:03.3		1.3	
		591.9	245	KM. 591,865.....	1			9:06.3		3.0	
		602.1		S. VICENÇ HORTS.....	1			9:10		3.3	
		604.2	225	KM. 604,166.....	1			9:11.3		1.3	
		607.2		KM. 607,225.....	1			9:13		1.3	
		612.9	170	PRAT LLOBREGT-AV.....	1			9:16.3		3.3	
		615.0	135	KM. 614,997.....	1			9:18.3		2.0	
		615.7		BIF. C. TUNIS-AV.....	1			9:20		1.3	
		618.1	105	KM. 618,069.....	1			9:22.3		2.3	
		621.0	085	BARNA-SANTS.....	1			9:27		4.3	

Figura 1-10. Fragmento de Hoja de Ruta del servicio 3063 entre Madrid y Barcelona. Fuente: Adif.

Durante la operación de los servicios ferroviarios de *Alta Velocidad* surgen frecuentemente incidencias que provocan retrasos. Si un maquinista considera que un retraso es excesivo, entonces ejecutará las acciones necesarias para recuperarlo mediante una conducción más rápida. La subjetividad en la elección del umbral de retraso, unido a que los maquinistas tienden a ejecutar conducciones conservadoras para recuperar los retrasos lo antes posible, contribuye a obtener consumos energéticos excesivos y dispersos cuando aparecen retrasos.

Por ello se propondrá un método para regular la conducción en tiempo real que recalculará, en las ocasiones en que sea necesario, nuevas conducciones eficientes para recuperar retrasos que cumplan con la puntualidad requerida en la estación de destino. El algoritmo de regulación en tiempo real tendrá en cuenta la incertidumbre asociada a la ejecución manual de las consignas mediante la introducción de números borrosos asociados a las mismas.

En resumen, la motivación de esta tesis es la necesidad de reducir el consumo energético en la operación de servicios ferroviarios de Alta Velocidad desde la fase de planificación y diseño de un servicio hasta la fase de explotación.

1.3. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis es la operación eficiente de servicios ferroviarios de *Alta Velocidad* desde la fase de planificación y diseño de un servicio hasta la fase de explotación, para lo cual se propondrán tres métodos relacionados entre sí, cada uno de los cuales resolverá una de las necesidades descritas anteriormente: el diseño eficiente de conducciones manuales, la optimización energética de horarios comerciales con restricciones de puntualidad y la regulación de la conducción en tiempo real. La Figura 1-11 muestra un diagrama con los tres bloques anteriores y la relación entre ellos.

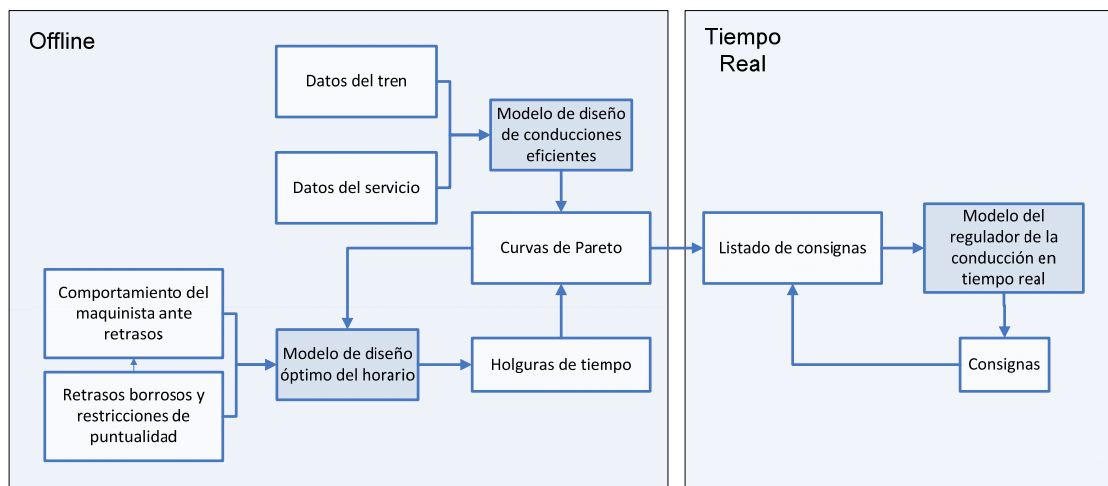


Figura 1-11. Diagrama de bloques del proceso de mejora de la eficiencia global de un servicio propuesto en la tesis.

Los objetivos específicos fruto de este objetivo global surgen como consecuencia de las necesidades detectadas y descritas en la sección 1.2. Dichos objetivos son los siguientes:

- Desarrollo y validación de un simulador ferroviario detallado de conducciones manuales en *Alta Velocidad*.

Este objetivo consiste en la elaboración de un simulador ferroviario preciso y rápido para el cálculo de tiempos de recorrido y consumos energéticos de conducciones manuales. Además, durante el desarrollo de la tesis se tendrá acceso a la realización de pruebas con el tren Talgo-Bombardier S-102, lo que permitirá el ajuste y la validación del modelo de simulación mediante medidas reales.

- Diseño automático offline de conducciones manuales eficientes.

Con este objetivo se persigue el diseño de conducciones eficientes mediante la utilización de diferentes estrategias de conducción, para lo que, en primer lugar, se deberá definir un modelo de conducción manual lo suficientemente flexible como para estudiar la gran variedad de conducciones posibles en una línea ferroviaria de *Alta Velocidad*. Por otro lado, el modelo deberá tener en cuenta que las conducciones diseñadas serán implementadas manualmente por los maquinistas, de manera que

deberán ser suficientemente sencillas de aplicar, pero a la vez suficientemente generales como para no limitar el espacio de búsqueda.

En segundo lugar se diseñará un algoritmo de diseño automático que, sirviéndose del modelo de conducción anterior, sea capaz de calcular, dado un tiempo de recorrido, las consignas de conducción manuales que lo satisfagan produciendo el mínimo consumo energético.

- Diseño óptimo de horarios con requisitos de puntualidad.

Este objetivo consistirá en el diseño de un modelo de optimización matemática que distribuya de forma eficiente la holgura de tiempo disponible en un servicio a lo largo de sus diferentes trayectos teniendo en cuenta requisitos de puntualidad en las estaciones con parada.

El modelo tendrá en cuenta la incertidumbre asociada a los retrasos originados durante el servicio, que serán considerados como números borrosos cuyo origen estará localizado en las estaciones del mismo. Por tanto, los requisitos de puntualidad se expresarán mediante medidas borrosas de puntualidad a la llegada a cada estación del servicio.

- Regulación de la conducción en tiempo real.

Se desarrollará un algoritmo que monitorice los retrasos del tren en tiempo real durante el servicio y que recalculé la marcha económica del tren de acuerdo con la nueva situación de retraso actual y los requisitos de puntualidad en la llegada a estación.

El modelo tendrá en cuenta la incertidumbre asociada a la ejecución manual de las consignas por parte del maquinista, expresadas también mediante números borrosos.

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento de la tesis está dividido en cinco capítulos. En este primer capítulo, además de una breve introducción de la evolución del ferrocarril a lo largo de la historia, se ha detallado la motivación, el enfoque y los objetivos de la tesis.

El capítulo segundo se centrará en el diseño automático de conducciones manuales eficientes, en el que se describirá tanto el simulador empleado para el cálculo de tiempos de recorrido y consumos energéticos como el algoritmo de optimización de las conducciones manuales utilizado.

El capítulo tercero detallará el modelo de diseño óptimo de horarios bajo incertidumbre con criterios de puntualidad.

El capítulo cuarto se centrará en el modelo de regulación de la conducción manual en tiempo real.

Finalmente, en el capítulo quinto se resumirá las conclusiones generales de la tesis, las aportaciones originales, se listarán las publicaciones realizadas y se propondrán desarrollos futuros.

DISEÑO AUTOMÁTICO DE CONDUCCIONES EFICIENTES

2.1. INTRODUCCIÓN

Para reducir el consumo energético de los trenes de *Alta Velocidad* se puede actuar en la fase de diseño del propio tren (reduciendo su peso, su resistencia al avance, mejorando la eficiencia del freno regenerativo, etc.) o de la línea (mediante trazados horizontales y que eviten en lo posible las reducciones de velocidad). Una vez realizada la construcción de la infraestructura y la selección de un material rodante por parte del operador, dichos factores quedan fijos, y el mayor o menor consumo energético de un servicio será debido a la eficiencia en la fase de operación. Dicha eficiencia se podrá mejorar mediante el diseño de conducciones económicas y el diseño eficiente de horarios, temas de los que tratarán los capítulos 2 y 3 de la tesis.

El presente capítulo abordará la conducción manual eficiente de trenes de *Alta Velocidad* a lo largo de trayectos comerciales, es decir, la manera en que los maquinistas pueden reducir el consumo energético mediante la manipulación adecuada de los controles de conducción del tren, principalmente los mandos de tracción y freno.

El problema del diseño de la conducción manual óptima de un tren a lo largo de un trayecto en *Alta Velocidad* consiste en calcular las consignas de alto nivel necesarias para satisfacer un tiempo de recorrido comercial con el mínimo consumo energético.

Dichas consignas serán transmitidas al maquinista, y se traducirán en cada instante en un valor de esfuerzo de tracción/freno.

El primer estudio sobre conducción eficiente de trenes fue realizado en 1968 por K. Ichikawa (Ichikawa 1968), que resolvió analíticamente mediante un modelo lineal y aplicando el principio del máximo de Pontryagin el control óptimo de un tren a lo largo de un trayecto ferroviario. A pesar de las simplificaciones asociadas a la metodología aplicada, este estudio estableció las bases de la conducción óptima a lo largo de un trayecto horizontal con restricciones de velocidad, que consistía en un primer tramo de aceleración a tracción máxima, un segundo tramo de regulación constante de velocidad, un tercer tramo de deriva, y un último tramo de freno aplicando el máximo esfuerzo de freno, tal como muestra el perfil de velocidad de la Figura 2-1 sobre una línea de 100 km.

A la misma conclusión que Ichikawa se llega en (Yasukawa et al. 1987), donde los autores estudian cuatro estrategias de conducción eficiente, mostrando ahorros de hasta el 10% comparado con el consumo medio. Este ahorro es incrementado en (Van Dongen and Schuit 1989), donde los autores cuantifican el potencial de ahorro energético en el 20-25% comparando conducciones reales con sus conducciones diseñadas en el trayecto Zandvoort-Maastricht/Heerlen (Holanda).

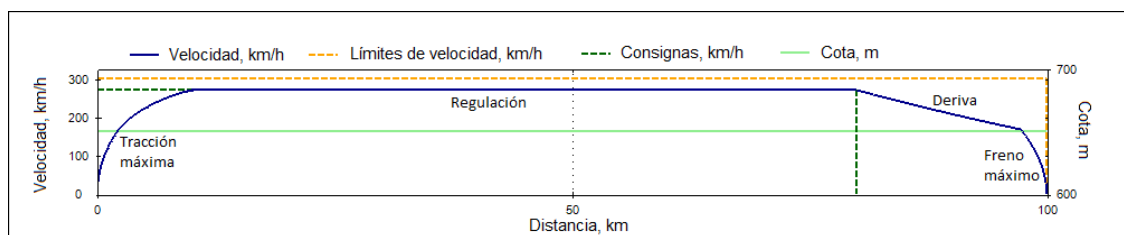


Figura 2-1. Conducción eficiente consistente en un tramo de aceleración a tracción máxima, uno de regulación, otro de deriva y uno de deceleración con máximo esfuerzo de freno en un trayecto horizontal.

La *regulación de velocidad* es una estrategia de conducción que consiste en la aplicación del esfuerzo necesario, tanto de tracción como de freno, para mantener una velocidad constante, que deberá ser inferior a la velocidad máxima permitida de la línea.

Por otro lado, la *deriva* es otra estrategia de conducción que consiste en aplicar un esfuerzo de tracción nulo, quedando el movimiento del tren gobernado por las fuerzas externas (resistencia al avance, resistencia a la pendiente y resistencia al radio de curvatura).

Estos estudios abren una vía de investigación sobre la que se han realizado y se siguen realizando numerosos estudios en la actualidad. La presente introducción realizará un repaso exhaustivo de los trabajos más relevantes atendiendo a dos criterios; por un lado las estrategias de conducción eficiente empleadas, y por otro los métodos para obtener automáticamente las conducciones óptimas en trayectos comerciales.

2.1.1. ESTRATEGIAS DE CONDUCCIÓN

En primer lugar se definirá el concepto de conducción eficiente que será empleado en la presente tesis. Se define conducción eficiente de un servicio comercial ferroviario a lo largo de un trayecto como un conjunto de estrategias de conducción eficiente distribuidas a tramos a lo largo del mismo, y que estarán destinadas a minimizar el consumo energético cumpliendo con la puntualidad del servicio.

Por otro lado, se define estrategia de conducción eficiente como una directriz o consigna de alto nivel destinada al ahorro energético, que se traduce en unos valores concretos de solicitud de esfuerzo de tracción/freno aplicados de forma manual o automática y que dan lugar a un perfil de velocidad característico.

En este apartado se realizará una revisión de todas las estrategias de conducción eficientes empleadas en la literatura, tanto para su aplicación en trenes dotados de ATO (Automatic Train Operation) como para trenes conducidos de manera manual. Aunque en principio se puedan aplicar todas las estrategias de conducción eficiente tanto con ATO como con conducción manual, en la práctica cada sistema impondrá una serie de restricciones. Por ejemplo, los sistemas ATO metropolitanos están limitados a combinar los parámetros de configuración que definen sus estrategias de conducción eficiente, y en general dichos parámetros admiten un conjunto discreto y relativamente pequeño de valores (Domínguez et al. 2011), mientras que en conducción manual el número de estrategias de conducción a aplicar a lo largo de un trayecto comercial estará limitado por la capacidad del maquinista para implementarlas.

A pesar de las diferencias entre conducción automática y manual, la naturaleza de las estrategias de conducción empleadas en cada una de ellos es la misma, y por tanto no se hará distinción entre unas y otras. Las estrategias de conducción analizadas en la literatura son: selección de aceleración y deceleración a porcentaje de esfuerzo máximo, regulación de velocidad, aplicación de deriva, ciclo deriva-remotor y regulación de velocidad sin freno.

Aceleración y deceleración a porcentajes de esfuerzo máximos

Esta estrategia de conducción eficiente consiste en realizar los procesos de aceleración y deceleración del tren al mayor porcentaje de esfuerzo de tracción y freno eléctrico respectivamente, donde el porcentaje de tracción se define según la ecuación 2.1 y el de freno según la ecuación 2.2 (Lukaszewicz 2000).

$$x_t = \frac{F_t}{F_{t,max@v}} \quad 2.1$$

Siendo x_t el porcentaje de tracción, F_t el esfuerzo de tracción instantáneo suministrado por el motor, y $F_{t,max@v}$ el esfuerzo de tracción máximo que es capaz de suministrar el motor a la velocidad v .

$$x_e = \frac{F_e}{F_{e,max@v}} \quad 2.2$$

Siendo x_e el porcentaje de freno eléctrico, F_e el esfuerzo de freno eléctrico instantáneo suministrado por el motor, y $F_{e,max@v}$ el esfuerzo de freno máximo que es capaz de suministrar el motor a la velocidad v .

La justificación de ambas estrategias está basada en el aumento de los rendimientos de tracción y freno eléctrico a porcentajes de tracción y freno elevados (Rongfang and Golovitcher 2003), (C. S. Chang and Sim 1997) y (Miyatake and Ko 2010). Son numerosos los estudios de conducciones óptimas que emplean estas estrategias, como (Alves and Pires 2010), (Albrecht et al. 2010) y (Bocharnikov, Tobias, and Roberts 2010), aunque en ocasiones sin especificarlo explícitamente, ya que con frecuencia se dan por supuestas, no solo por la eficiencia conseguida, sino porque permiten la mínima pérdida de tiempo durante los procesos de tracción y freno. No obstante se encuentran excepciones, como en (Jong and Chang 2005b), donde se propone el uso de un porcentaje de tracción del 85% ante bajadas de tensión en la catenaria.

Estas estrategias en general son válidas para líneas de metro donde se permiten valores de aceleración, deceleración y jerk (variación de la aceleración respecto al tiempo) elevados. En cambio no lo son tanto en *Alta Velocidad*, donde en general las exigencias de confort son mayores que en los sistemas de metro. En particular, los procesos de frenado en *Alta Velocidad* se suelen modelar mediante una deceleración de servicio confortable para el viajero y constante, que implica un porcentaje de esfuerzo reducido (Y. Wang et al. 2011).

Regulación de velocidad

La estrategia de regulación de velocidad es una de las más empleadas en la literatura, y consiste en la aplicación del esfuerzo de tracción o freno necesario para mantener una velocidad constante inferior a la velocidad máxima permitida de la línea, como muestra la Figura 2-2, donde la línea azul indica la velocidad y la roja el esfuerzo de tracción aplicado por el tren en función de la posición del mismo. Dicho esfuerzo de tracción variará según la pendiente de la vía para mantener la velocidad de regulación.

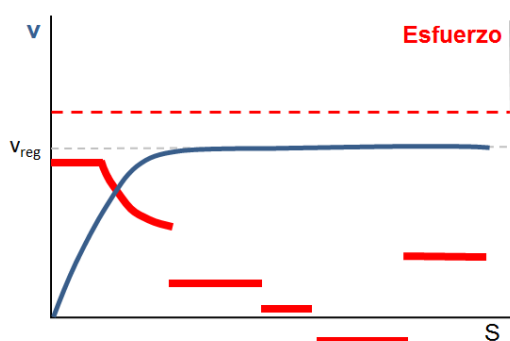


Figura 2-2. Estrategia de regulación de velocidad.

Desde su origen en (Ichikawa 1968), esta estrategia ha sido empleada en numerosos estudios. En (Howlett, Milroy, and Pudney 1994) los autores consideran un tren a lo largo de una línea horizontal con diferentes límites de velocidad, llegando a la conclusión de que existe una única velocidad de regulación que minimiza el consumo energético para cada tiempo de recorrido. En (Golovitcher 2001) y (Rongfang and Golovitcher 2003) también se calcula la velocidad de regulación óptima, que es la única estrategia a implementar en la conducción óptima que proponen.

En (Jong and Chang 2005b) se utiliza también la regulación de velocidad como la principal estrategia de conducción eficiente, a la que se añaden una serie de reglas generales a la hora de calcular la velocidad de regulación óptima, como la no consideración de tramos con un límite de velocidad máxima elevado cuando éstos son de longitud reducida. Este estudio pone de relieve la complejidad de estos sistemas, argumentando que la conducción eficiente a lo largo de un trayecto deberá estar formada en general por una combinación de estrategias de conducción óptima en lugar de por una única estrategia, como sugerían los primeros estudios.

Derivas

La deriva es la principal estrategia de conducción eficiente, y está basada en la aplicación de un esfuerzo de tracción nulo. El tipo de deriva más empleado en la literatura y el primero en ser estudiado consiste en la deriva final aplicada inmediatamente antes de la curva de freno de entrada a estación, como se muestra en la Figura 2-3, donde la línea azul indica la velocidad y la roja el esfuerzo de tracción aplicado por el tren en función de la posición del mismo. Los tramos de deriva también pueden estar localizados durante el trayecto. Por ejemplo, en (Jong and Chang 2005b) se propone la aplicación de tramos de deriva previos a pendientes pronunciadas.

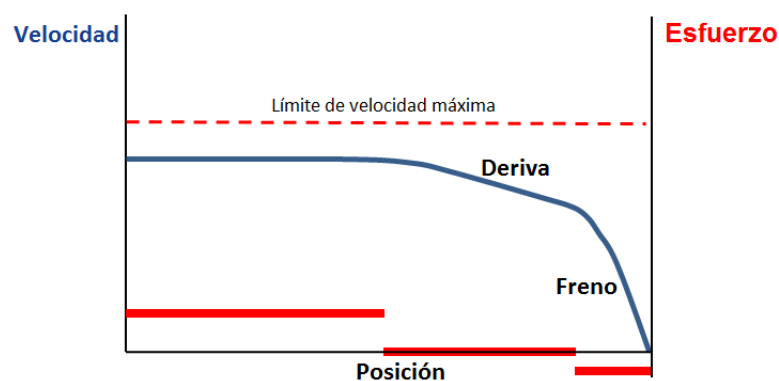


Figura 2-3. Deriva final previa a entrada en estación.

La deriva final supone para la mayoría de los autores que han estudiado el problema de la conducción eficiente un punto de encuentro común, considerándola la estrategia de conducción más eficiente. Para caracterizar un tramo de deriva final, en (Lukaszewicz 2000) se define el grado de deriva (degree of coasting) antes de una reducción de velocidad o parada como el cociente entre la distancia realizada en deriva y la suma de las distancias de deriva y freno.

Existen estudios como (Acikbas and Soylemez 2008) en los que la conducción óptima está basada únicamente en un proceso de tracción seguido de una deriva final y un proceso de frenado. La aplicación práctica de este tipo de conducciones es solo posible en trayectos cortos donde no se llega a alcanzar la velocidad máxima permitida, como en líneas de metro, de manera que no son viables para *Alta Velocidad*.

Muchos estudios han basado sus conducciones óptimas en un tramo de regulación de velocidad seguido de un tramo de deriva final (Van Dongen and Schuit 1989), diferenciándose unos de otros en la manera de calcular el punto de comienzo de la deriva final, la velocidad de regulación o ambas.

Otro tipo de deriva introducido en (Leander et al. 2000) consiste en evitar el uso del freno en tramos en los que la pendiente haría que la velocidad del tren superase la velocidad de regulación en caso de circular en deriva. Para ello, se trata de realizar una deriva previa al tramo de pendiente pronunciada de tal manera que la velocidad del tren durante dicha deriva disminuya y compense el aumento de velocidad posterior durante el tramo de pendiente. Esta estrategia se muestra en la Figura 2-4, donde la línea azul indica la velocidad, la roja el esfuerzo de tracción y la verde la pendiente, todas ellas en función de la posición del tren. Este tipo de deriva en la práctica es de difícil aplicación en conducción manual, ya que requiere que el maquinista esté permanentemente pendiente de los sucesivos tramos de deriva. Otra estrategia basada en evitar el uso del freno de mayor facilidad para su aplicación es la estrategia de regulación sin freno, definida únicamente con un valor de velocidad de regulación y una consigna de no utilización del freno, como se detallará a continuación.

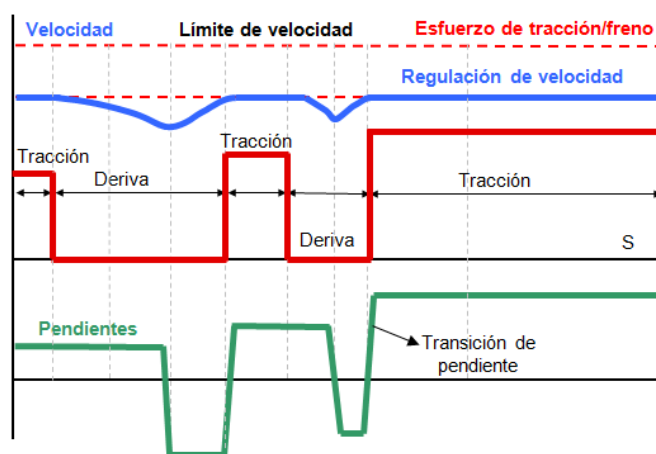


Figura 2-4. Deriva previa a pendiente pronunciada.

Por otro lado, la concatenación alternativa entre tramos de deriva y tramos de tracción formará una estrategia de conducción llamada deriva-remotor, que será detallada como una estrategia independiente por su frecuente uso en la literatura (Figura 2-5).

Por último, otro tipo de deriva es la utilizada en la estrategia de regulación de velocidad sin freno, que también se detalla como una estrategia diferente, y que será

la principal estrategia de conducción eficiente empleada en la presente tesis (Figura 2-7).

Deriva-Remotor

La estrategia de conducción *deriva-remotor* consiste en la aplicación alternativa de un tramo de deriva seguido de otro tramo de tracción o remotor. Normalmente, dicha estrategia es caracterizada mediante el uso de dos parámetros, la velocidad de deriva y la velocidad de remotor (Bocharnikov et al. 2007), de manera que el tren realice tramos de tracción hasta alcanzar la velocidad de deriva, momento en que comenzará un tramo de deriva hasta que su velocidad disminuya hasta la velocidad de remotor. Esta estrategia se muestra en la Figura 2-5, donde la línea azul indica la velocidad y la roja el esfuerzo de tracción, ambas en función de la posición del tren. Otra forma de caracterizar esta estrategia es mediante la posición de los puntos de transición entre los tramos de deriva y los tramos de remotor (C. S. Chang and Sim 1997).

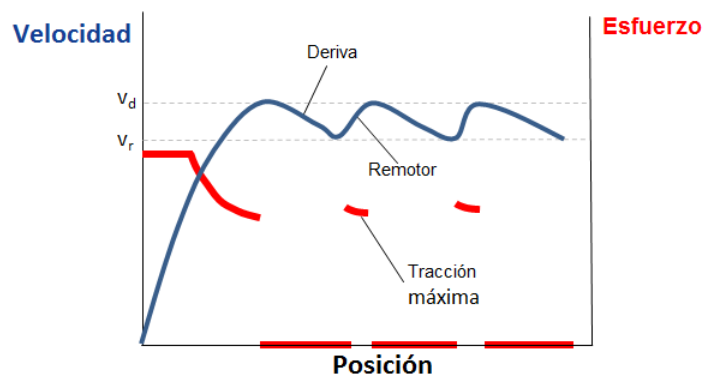


Figura 2-5. Estrategia de conducción deriva-remotor.

La estrategia deriva-remotor es utilizada en (Cheng and Howlett 1993), (Howlett 1995), (De Cuadra et al. 1996), (C. S. Chang and Sim 1997), (Wong and Ho 2004a), (Bocharnikov et al. 2007) y (Bocharnikov, Tobias, and Roberts 2010). Con esta estrategia se debe tener especial cuidado en la elección de las velocidades de deriva y remotor con el fin de realizar un tramo de deriva anterior a la curva de frenado final, y no uno de tracción, como muestra la Figura 2-6. En (Wong and Ho 2004a) se afirma que los dos factores fundamentales para determinar el número óptimo de derivas en un trayecto son el perfil de la línea y la longitud del mismo. En relación a este tipo de conducciones, en (Acikbas and Soylemez 2008) se introduce una distancia medida desde la estación de salida, a partir de la que se puede aplicar la primera deriva con el fin de evitar las derivas a velocidades excesivamente bajas.

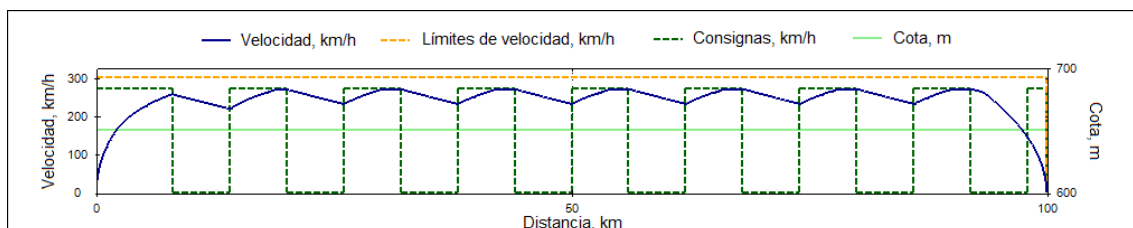


Figura 2-6. Conducción basada en ciclos de deriva-remotor.

Regulación de velocidad sin freno

La estrategia de conducción eficiente denominada regulación de velocidad sin freno consiste en la aplicación del esfuerzo de tracción necesario para mantener al menos una velocidad consigna (siempre que ésta se encuentre por debajo de la velocidad máxima permitida de la línea), de manera que si el valor de rampa en la vía exigiera aplicar esfuerzo de tracción para mantener dicha velocidad consigna, se aplicaría el esfuerzo de tracción necesario. Por el contrario, si debido a la pendiente de la vía fuera necesario aplicar esfuerzo de freno para mantener la velocidad, no se aplicaría freno sino una deriva, permitiendo que la velocidad del tren aumentara por encima de la velocidad de consigna.

La velocidad máxima de la línea (límites civiles) se debe respetar en todo momento, por lo que si en un determinado momento se alcanzara esta velocidad máxima, entonces se aplicaría el esfuerzo de freno necesario para no rebasarla. Del mismo modo, si estando el tren en deriva las características de la línea provocaran la disminución de su velocidad hasta alcanzar la velocidad de consigna, entonces se aplicaría de nuevo el esfuerzo de tracción necesario para mantener dicha velocidad. Esta estrategia se muestra en la Figura 2-7, donde la línea azul representa la velocidad y la roja el esfuerzo de tracción, que variará en función de la pendiente de la línea.

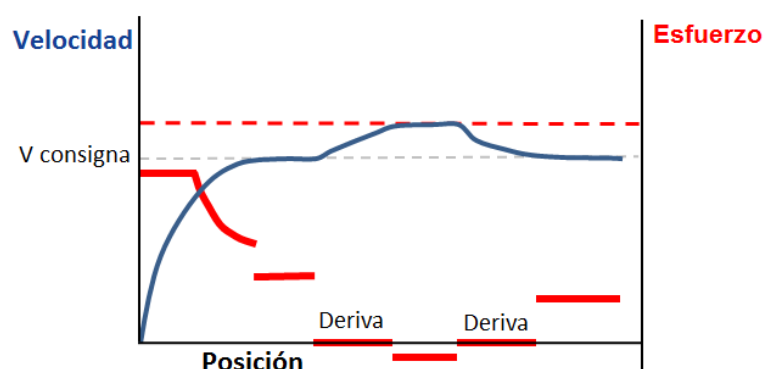


Figura 2-7. Estrategia de regulación de velocidad sin freno.

Esta estrategia de conducción es utilizada por primera vez en (Hee-Soo 1998), y son pocos los autores que se han servido de ella para diseñar conducciones óptimas. Esta estrategia de conducción es una mezcla entre la regulación de velocidad y la aplicación de tramos de deriva, y su objetivo es evitar los procesos de frenado necesarios en la regulación de velocidad pura, evitando así disipar la energía cinética (García 2007).

Las estrategias de conducción manual eficientes para minimizar el consumo energético a lo largo de un trayecto son bien conocidas, pero debido a la complejidad de los estudios realizados y a la necesidad de simplificación que requieren determinadas técnicas, no han sido utilizadas de la manera más flexible. Tradicionalmente se han modelado las conducciones mediante un conjunto reducido de parámetros fijos a lo largo del trayecto considerado, lo que ha servido razonablemente bien para líneas de metro y corto recorrido. En cambio, las conducciones en *Alta Velocidad* deben definirse mediante un conjunto más amplio de estrategias a ejecutar en diferentes tramos del trayecto, que podrán ser del mismo

tipo pero definidas mediante distintos valores de sus parámetros en cada tramo, dependiendo de las características del tren y de la línea. El modelo que se propondrá en la tesis permitirá generar un espacio de soluciones de conducciones eficientes más amplio que el empleado con otros modelos de conducción, que utilizan una sola estrategia de conducción eficiente en cada trayecto. Además, se podrán introducir fácilmente restricciones específicas para la conducción manual, como número máximo de cambios de estrategia, tiempo mínimo entre cambios de estrategia, etc., eliminando así soluciones de tipo control continuo que pueden implementarse en sistemas dotados de ATO pero que no son adecuadas para la conducción manual.

2.1.2. MÉTODOS DE RESOLUCIÓN

Una vez analizadas las distintas estrategias de conducción eficiente que puede emplear el maquinista, se revisarán los diferentes métodos que se han empleado históricamente para diseñar conducciones eficientes tanto en líneas de metro como de largo recorrido, alimentadas tanto en corriente continua como alterna.

Sea cual sea el método elegido, el problema de obtener la conducción manual óptima de un tren a lo largo de un trayecto en *Alta Velocidad* se traduce en seleccionar los valores de las consignas que definen las estrategias de conducción de alto nivel para cumplir con el horario comercial y consumiendo la mínima cantidad de energía.

El diseño de conducciones eficientes ha sido estudiado desde muy diferentes perspectivas, tanto prácticas como teóricas. Según el método de resolución empleado, hay estudios basados en el análisis de conducciones reales implementadas por maquinistas expertos, que son monitorizadas y analizadas, estudios teóricos basados en métodos analíticos y finalmente estudios que utilizan algoritmos de búsqueda inteligente.

2.1.2.1. ANÁLISIS DE CONDUCCIONES REALES

La necesidad de reducir el consumo energético asociado a la operación ferroviaria ha llevado a distintas empresas operadoras a realizar sesiones de formación y entrenamiento de los maquinistas mediante la repetición sistemática de conducciones en servicios comerciales.

En (Renfe 2004) se realizó un concurso entre un grupo de maquinistas con el objetivo de obtener la conducción comercial eficiente en el servicio Madrid-Sevilla. Se registraron y analizaron 1416 servicios, llegando a la conclusión de que la conducción eficiente podía ahorrar el 9,5% respecto al consumo medio aplicando tramos de deriva a lo largo del 54% del trayecto en el sentido Madrid-Sevilla, y del 35% en sentido contrario.

Los ensayos realizados en servicios comerciales han mostrado que los maquinistas de los servicios de *Alta Velocidad* españoles tienden a aplicar conducciones muy similares a la marcha tendida, es decir, a la conducción de mínimo tiempo de recorrido, conduciendo cercanos a la velocidad máxima permitida en cada momento, y aplicando las máximas aceleraciones y frenados, aunque siempre respetando el confort del

viajero. Esto produce que los tiempos de recorrido de sus conducciones suelen ser menores que los tiempos de recorrido comercial, lo que provoca llegadas con cierto tiempo de adelanto a las estaciones de destino, tiempo que deberán gastar parados en dichas estaciones.

La Figura 2-8 muestra medidas registradas de diversos tiempos de recorrido y consumos de conducciones realizadas por maquinistas en tres trayectos comerciales, donde la línea de puntos azul indica el tiempo de recorrido comercial asignado a cada trayecto, corroborando lo indicado anteriormente. Por otro lado se muestran en la Figura 2-9 los tiempos de parada en estación en dichos servicios, que suelen ser mayores a los planificados en el horario comercial, indicados también mediante una línea punteada azul.

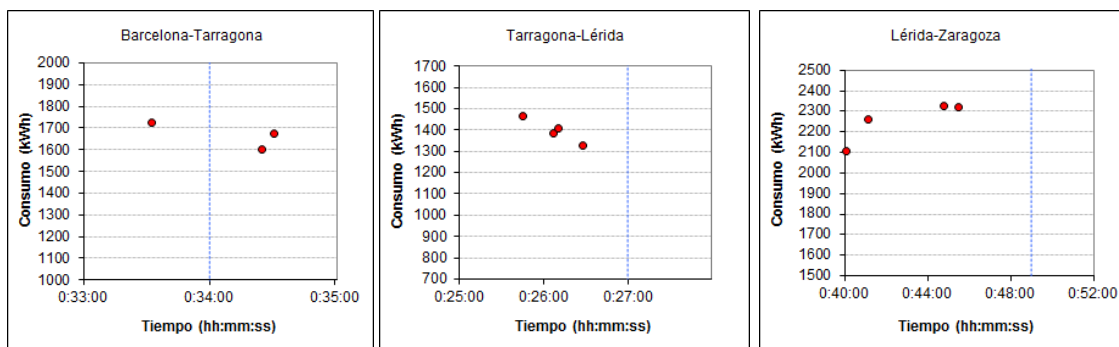


Figura 2-8. Tiempo de recorrido y consumo energético bruto en pantógrafo de conducciones registradas durante servicios comerciales 3991 entre Barcelona y Málaga.

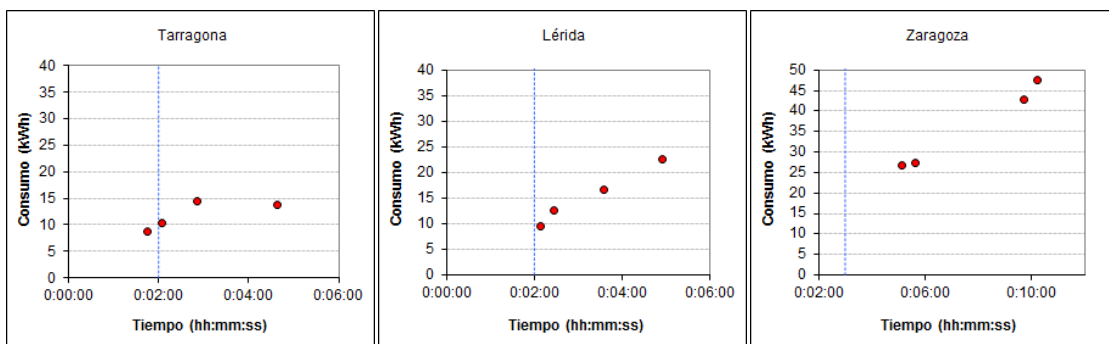


Figura 2-9. Tiempo de parada y consumo energético bruto en pantógrafo de conducciones registradas durante servicios comerciales 3991 entre Barcelona y Málaga.

La ventaja de este tipo de estudios es la implicación directa de los maquinistas en la obtención de conducciones eficientes. No obstante, este enfoque requiere largos periodos de análisis, además de que no garantiza la obtención de la conducción óptima. Además, no supone un método flexible ante cambios en el horario como la disminución del tiempo de recorrido comercial o la inclusión de un nuevo límite de velocidad temporal, lo que requeriría un nuevo estudio para determinar una nueva conducción eficiente. Por tanto, éste es un método poco eficaz para la obtención de conducciones eficientes de servicios comerciales a gran escala.

Otra forma de análisis empleada también en literatura consiste en la toma de registros detallados de conducciones reales para su posterior análisis y extracción de conclusiones.

Así, en (Grillo et al. 2006) se introduce un sistema de monitorización embarcado que transmite registros eléctricos al puesto de control, donde se utilizan para minimizar el consumo energético de la conducción mediante la aplicación de un *Algoritmo Genético*.

Por otro lado, en (Landi and Luiso 2008) se plantea un método para reducir la potencia consumida basado en el correcto uso de las curvas de esfuerzo de tracción e intensidad consumida a través del estudio de medidas registradas mediante el empleo de otro *Algoritmo Genético*.

En este tipo de análisis también se requiere un sistema real en explotación para llevarlos a cabo, lo que no permite generalizar el método para nuevos servicios.

2.1.2.2. MÉTODOS ANALÍTICOS

Desde su aparición en (Ichikawa 1968), los métodos analíticos han sido los más utilizados hasta los inicios del año 2000, donde gracias al rápido avance de los ordenadores, comenzaron a proliferar otros métodos basados en simulación y búsqueda inteligente, que requieren generalmente mayor potencia de cálculo que los primeros.

La programación matemática es un procedimiento mediante el cual se formula un problema a través de un sistema de restricciones y una función objetivo a optimizar. En el contexto de la optimización energética de la conducción, la función objetivo será la correspondiente al consumo energético del tren, función no lineal dependiente de la velocidad a lo largo del trayecto.

- Control óptimo. Principio del Máximo o de Pontryagin (PM)

El Principio del Máximo o de Pontryagin, formulado en 1956 por el matemático Lev Semenovich Pontryagin (Boltyanskii, Gamkrelidze, and Pontryagin 1956), consiste en la obtención del control óptimo en un sistema dinámico al pasar de un estado a otro dominado por restricciones en dicho estados y/o en las propias variables de control.

El principio del máximo ha sido utilizado en numerosas ocasiones para obtener el control óptimo de la conducción. Se utilizó por primera vez en (Ichikawa 1968) y posteriormente en (Asnis, Dmitruk, and Osmolovskii 1985a), (Howlett, Milroy, and Pudney 1994), (Khmelnitsky 2000), (Golovitcher 2001), (Rongfang and Golovitcher 2003), (Howlett, Pudney, and Vu 2009), (Bureika, Subacius, and Kumara 2009) y (Albrecht et al. 2010). Esta técnica requiere del uso de ecuaciones lineales o cuasi-lineales asumiendo simplificaciones en los modelos, ya sea considerando un espacio de control de tracción discreto (tracción máxima, deriva, freno máximo) en lugar de continuo como sucede en la realidad (Khmelnitsky 2000), (Li et al. 2012), simplificando la zona de esfuerzo constante de la curva de tracción del tren (Howlett, Milroy, and Pudney 1994), considerando entonces que éste trabajará siempre en la zona de

potencia constante, considerando la resistencia al avance como una sucesión de tramos lineales (Vašak et al. 2009), o considerando el rendimiento del equipo de tracción constante (Rongfang and Golovitcher 2003), (C. S. Chang and Sim 1997).

Estas simplificaciones posibilitan la aplicación del Principio del Máximo o de Pontryagin a costa de perder precisión en los cálculos, de manera que las soluciones obtenidas, a pesar de ser óptimos globales, lo son de los sistemas simplificados asociados, y no del sistema real al que representan.

- Programación dinámica

La Programación Dinámica, introducida por Richard Bellman en 1973 (R. Bellman 1973) es un método utilizado para optimizar problemas complejos. Para ello, se discretiza y secuencializa el problema inicial en subproblemas superpuestos. Esta técnica se basa en la propiedad de que cualquiera que sea el estado y la decisión inicial, las decisiones restantes deben constituir una política óptima con respecto al estado alcanzado desde la primera decisión (R. E. Bellman and Kalaba 1964).

Este método es empleado en sucesivos estudios (Ko, Koseki, and Miyatake 2004) (Katori and Izumi 2008) y (Miyatake and Ko 2010), donde se utilizan modelos que tienen en cuenta los límites de velocidad, las pendientes y el freno regenerativo, y son aplicados a líneas de corto recorrido. Mediante la programación dinámica se pueden abordar aspectos de este tipo de sistemas como las funciones no lineales del esfuerzo de tracción, del de freno o de la resistencia al avance, que entrañan dificultades para otros métodos como el Principio del Máximo de Pontryagin. No obstante, esta técnica necesita la discretización del espacio de soluciones, lo que limita el resultado final.

- Programación Dinámica Discreta

La Programación Dinámica Discreta es un caso particular de la Programación Dinámica donde solo se permite una variación discreta de determinadas variables. Este método es empleado en (Franke, Terwiesch, and Meyer 2000), donde se describe un algoritmo de programación dinámica discreta para optimizar la conducción en tiempo real empleando para ello un modelo detallado de la dinámica del tren. La misma técnica se utiliza en (Kuriyama, Yamamoto, and Miyatake 2010) para calcular perfiles de velocidad óptimos que minimicen el consumo total de energía para un tiempo de recorrido determinado. Este método no es aplicable en el problema de la conducción manual en *Alta Velocidad* que se estudia en esta tesis, ya que la variable de control (esfuerzo de tracción y freno) podrá variar de forma continua.

- Método del gradiente

El método del gradiente es un método iterativo utilizado para resolver numéricamente los sistemas de ecuaciones lineales cuyas matrices son simétricas y definidas positivas. Son de útil aplicación para los sistemas en los que no se pueden aplicar métodos directos como la descomposición de Cholesky por ser demasiado grandes. Su uso es frecuente para resolver los problemas de optimización sin restricciones, como la minimización del consumo energético. Este método es empleado en (Miyatake and Ko 2007) y (Miyatake and Ko 2010) para minimizar el consumo energético de perfiles de

velocidad de trenes alimentados en corriente continua. En este último además se emplea este método para controlar el estado de carga de acumuladores embarcados en el tren.

- Programación Secuencial Cuadrática

La Programación Secuencial Cuadrática es un método iterativo utilizado para la optimización de sistemas no lineales, donde tanto la función objetivo como las restricciones deben tener doble derivada continua. Este método resuelve de forma secuencial una serie de subproblemas, cada uno de los cuales optimiza un modelo cuadrático de la función objetivo sujeto a unas restricciones linealizadas. Este método ha sido empleado en (Miyatake and Ko 2010).

Como caso particular de la Programación Secuencial Cuadrática se encuentra la Programación Cuadrática Multiparamétrica, utilizada en (Vašak et al. 2009), donde la curva de resistencia al avance se modela mediante una curva lineal a tramos para poder aplicar el método.

Los métodos analíticos listados anteriormente se encuentran con dificultades al tratar de modelar sistemas reales no lineales con alto grado de detalle y complejidad, donde las variables de control (esfuerzo de tracción y freno) varían de forma continua, lo que caracteriza precisamente el problema de la conducción manual en *Alta Velocidad* que se pretende resolver en este capítulo, por lo que dichas técnicas han sido descartadas en la tesis.

2.1.2.3. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN NUMÉRICOS

Los métodos numéricos, también llamados métodos meta-heurísticos (del griego heuriskein, que significa descubrir o encontrar) fueron inicialmente descartados para diseñar conducciones óptimas, especialmente en tiempo real, debido a la elevada potencia de cálculo que requerían. No obstante, a finales de los años 90 comenzaron a emplearse gracias al rápido avance de la informática (Rongfang and Golovitcher 2003). Esto ha posibilitado en las últimas décadas el uso de simuladores detallados del movimiento del tren y equipos de tracción, que se han convertido en la principal herramienta para predecir el comportamiento de sistemas reales (Goodman, Siu, and Ho 1998).

Para resolver el problema de la conducción óptima mediante el uso de simuladores, es necesario combinarlos con algoritmos de búsqueda, siendo los más empleados los Algoritmos Genéticos, la Búsqueda Tabú, el Templado Simulado o la Optimización con Colonia de Hormigas.

La ventaja de estos métodos es su compatibilidad con las no linealidades propias de las ecuaciones del movimiento del tren y sus restricciones. No obstante, tienen la desventaja de que no garantizan el óptimo global. El diseño de un buen algoritmo numérico de optimización permitirá la amplia exploración del espacio de soluciones para garantizar en la medida de lo posible el óptimo global. Además, en el problema de ingeniería que se pretende resolver no se considera tan necesaria la obtención del

óptimo global como el hecho de diseñar una conducción situada cercana a la curva de Pareto.

- Algoritmos Genéticos

Los *Algoritmos Genéticos* fueron introducidos por J. Holland en 1975 (Holland 1975). Son algoritmos iterativos y adaptativos de búsqueda basados en la selección natural y la genética natural, que guían la búsqueda a través del espacio de soluciones, en los que se emplea una función objetivo que evalúa la bondad de los elementos presentes en la búsqueda, y en los que se produce un intercambio de información estructurado aunque aleatorio entre dichos elementos (Goldberg 1989).

Los *Algoritmos Genéticos* empleados para el diseño de conducciones eficientes fueron introducidos en (C. S. Chang and Sim 1997) para hallar conducciones eficientes basadas en la estrategia de deriva-remotor, obteniendo los puntos de cambio entre los tramos de deriva y remotor para integrarlos en un sistema de conducción automática (ATO). Su función objetivo considera el tiempo de recorrido de la conducción (con penalización exponencial si se desvía del tiempo de recorrido comercial), la energía consumida y el nivel de confort de la conducción (mediante el análisis del jerk).

En (Hee-Soo 1998) se combina la utilización de un *Algoritmo Genético* con *Lógica Borrosa*, utilizando un modelo para definir las conducciones muy simplificado, y evaluándolas según su energía consumida y tiempo de recorrido.

En (Seong Ho et al. 1999) también se introduce un *Algoritmo Genético* para un sistema ATO en el que las conducciones son modeladas mediante un número reducido de puntos de deriva a lo largo del trayecto.

En (Han et al. 1999) se utiliza un modelo de conducción basado en puntos de cambio entre tracción y deriva, y una función objetivo que evalúa la energía consumida, comparando este método de optimización numérico con el método de optimización propuesto en (Howlett, Milroy, and Pudney 1994) basado en la función de Lagrange y las ecuaciones de Kuhn-Tucker, afirmando superarlo.

En (Wong and Ho 2004a) se modela la conducción mediante uno o dos puntos de deriva. Su función objetivo considera el tiempo de recorrido y consumo energético, aunque sin penalizar las conducciones con tiempo de recorrido mayor al tiempo de recorrido comercial. Compara los *Algoritmos Genéticos* con la técnica "Nelder and Mead", basada en la extensión del método Simplex aplicado a búsquedas multidimensionales, concluyendo que los primeros necesitan en general menor número de iteraciones para trayectos con múltiples puntos de deriva.

En (Lechelle and Mouneimne 2010) se combina también el uso de un simulador con un *Algoritmo Genético* para hallar perfiles de velocidad óptimos en líneas de metro, especialmente para aplicaciones con ATO. Sus conducciones se basan en un conjunto de consignas de aceleración, deriva o freno, llegando a definir una conducción de 8 km con un conjunto de 18 órdenes de cambio, lo cual puede ser viable utilizando sistemas

de ATO, pero no en conducción manual donde un maquinista es el encargado de aplicar las consignas.

En (Bocharnikov et al. 2007) se emplea un *Algoritmo Genético* con una función objetivo que evalúa tanto el tiempo de recorrido como el consumo energético ponderados arbitrariamente según las características del trayecto a optimizar, y permitiendo un retraso de hasta el 20% en relación al tiempo objetivo. Sus conducciones están pensadas para aplicaciones de corto recorrido, ya que están basadas en la aplicación de pocos ciclos de deriva-remotor. De hecho en su caso ejemplo utiliza una línea de 8 Km. Para ello, las conducciones son modeladas únicamente mediante tres parámetros; el porcentaje de tracción en las aceleraciones, el porcentaje de freno en las deceleraciones y un factor de deriva que indica el momento de aplicación de la deriva en relación a la velocidad del tren.

Los mismos autores proponen en (Bocharnikov, Tobias, and Roberts 2010) una mejora para aumentar el espacio de soluciones de las conducciones, permitiendo la partición de un trayecto en diferentes tramos con límite de velocidad y pendiente constante, cada uno de ellos caracterizado con los tres parámetros definidos anteriormente. Esto permite una búsqueda de soluciones mucho más amplia, aunque el hecho de emplear porcentajes de tracción/freno constantes para definir sus conducciones sigue suponiendo una falta de flexibilidad.

En (Acikbas and Soylemez 2008) se utiliza también un *Algoritmo Genético* para optimizar conducciones sirviéndose también de una Red Neuronal para sustituir el uso de un simulador y reducir así el tiempo de cálculo. También se basa en estrategias de deriva-remotor, pero esta vez no definidas con sus correspondientes velocidades de deriva-remotor como en (Bocharnikov et al. 2007), sino introduciendo puntos espaciales de deriva y remotor. Su función objetivo pondera la energía consumida y el tiempo de recorrido sin penalizar los retrasos, de manera que se permiten conducciones con tiempos de recorrido mayores que el tiempo de recorrido comercial. Como se reconoce en el propio artículo, el modelo de conducción propuesto no es aplicable a largo recorrido dada la simplificación con que es modelada.

Los *Algoritmos Genéticos* se han combinado frecuentemente con el uso de simuladores, cuyo uso permite el cálculo preciso de tiempos de recorrido y consumos energéticos. En *Alta Velocidad*, es esencial el modelado de las conducciones, donde se debe permitir la aplicación de diferentes consignas durante el trayecto para ampliar al máximo el espacio de búsqueda.

- Redes Neuronales Artificiales

Las Redes Neuronales Artificiales son una técnica perteneciente a la Inteligencia Artificial que se ha utilizado en el contexto de la optimización de conducciones como alternativa al uso del simulador con el objetivo de predecir tiempos de recorrido y consumos energéticos a un menor coste de computación.

En (Acikbas and Soylemez 2008) se utilizan dos Redes Neuronales para hallar el tiempo de recorrido y el consumo energético de conducciones basadas en un punto único de deriva. Para predecir la energía consumida de dichas conducciones se utiliza una red neuronal basada en 2 entradas y una salida con 15 neuronas en la capa oculta (2-15-1 ANN), y para predecir el tiempo de recorrido se usa una 2-32-1 ANN. Este método se combina con un *Algoritmo Genético* para hallar los puntos de deriva óptimos de una conducción.

En (Hui-Jen et al. 2008) también se utiliza una Red Neuronal, esta vez para calcular la velocidad de deriva óptima, y en (Weidong et al. 2000) se utiliza esta técnica para estimar el consumo de diferentes subdivisiones de un trayecto, que previamente son entrenadas con un simulador. El trayecto se subdivide en un número de secciones dependiente del perfil del mismo y se hallan diferentes curvas de Pareto dependientes de la velocidad inicial y final discretas en cada subdivisión, y posteriormente se realiza una optimización mediante un *Algoritmo Genético*.

La aplicación de Redes Neuronales requiere del ajuste de la propia red, lo que se suele llevar a cabo para unas condiciones particulares, luego su uso aplicado al diseño de conducciones es poco flexible ante cambios en los datos de entrada, como la aparición de limitaciones temporales de velocidad, la variación de la masa del tren, etc. Ante cambios como estos, la red neuronal ajustada dejaría de ser válida, requiriendo un nuevo ajuste para las nuevas condiciones de circulación. Por otro lado, los simuladores, a pesar de requerir tiempos de diseño y construcción previa más elevados, posteriormente permiten la introducción sencilla de cambios en las condiciones del servicio, así como de nuevas restricciones o comportamientos.

- **Lógica Borrosa**

La lógica borrosa es una técnica basada en la teoría borrosa introducida por L.A. Zadeh (Zadeh 1965). En (Hee-Soo 1998) se combina un *Algoritmo Genético* con el empleo de Lógica Borrosa aplicada a un control, en el que se definen una serie de reglas lingüísticas para ayudar a los maquinistas a ahorrar energía. De manera similar, en (Z. Wang, Wang, and Jia 2005) se diseña un control borroso para optimizar conducciones en *Alta Velocidad* sujetas a un tiempo de recorrido objetivo.

En (Bocharnikov et al. 2007) se combinan conjuntos borrosos junto con *Algoritmos Genéticos*. Estos conjuntos entran en juego en la función objetivo para penalizar las conducciones que consumen más del 60% de la energía consumida a marcha tendida por un lado, y las conducciones con un tiempo de recorrido que difiera del tiempo de recorrido comercial en más de un 20%.

- **Optimización con Colonia de Hormigas**

La optimización con colonia de hormigas es un proceso de búsqueda heurístico que fue introducido por (Dorigo, Vaniezzo, and Colorni 1996), basado en el método que usan las hormigas para encontrar alimento. En (Bwo-Ren, Meng-Chieh, and Chun-Liang 2009) se utiliza un caso particular de Algoritmo de Colonia de Hormigas para optimizar el perfil de velocidad de las conducciones para trayectos de corto recorrido.

2.1.2.4. MODELOS BASADOS EN SIMULACIÓN

Algunos de los trabajos citados previamente se sirven del uso de simuladores para el cálculo preciso de tiempos de recorrido y consumos energéticos de las conducciones propuestas (Lechelle and Mouneimne 2010), (Rongfang and Golovitcher 2003), (Bocharnikov et al. 2007), (Acikbas and Soylemez 2008) y (Wong and Ho 2004a), (De Cuadra et al. 1996), cuyo uso se popularizó gracias al avance de los ordenadores. En (Goodman, Siu, and Ho 1998) se revisan los simuladores más destacados y se comenta la adecuación de combinar el avance del reloj de simulación por medio de paso discreto y de evento discreto para mejorar el tiempo de cálculo.

La complejidad de los modelos empleados en los simuladores varía en función de las necesidades de los estudios para los que han sido empleados. La mayoría de ellos introducen simplificaciones con el fin de reducir el tiempo de cálculo. En algunos se trata al tren como una masa puntual concentrada en el punto medio del mismo (Franke, Terwiesch, and Meyer 2000), (Bocharnikov et al. 2007), (Howlett, Milroy, and Pudney 1994), lo que puede dar lugar a imprecisiones al no tener en cuenta su efecto asociado a la pendiente media o a los límites de velocidad. En concreto éste último hace que ante un incremento de la velocidad máxima de la línea, el tren no pueda acelerar hasta que su cola supere la posición de dicho incremento, y ante una disminución de la misma, la cabeza del mismo deba llegar a la posición de disminución con la velocidad requerida. Esta consideración no es tan relevante en sistemas metropolitanos, ya que el tren no suele alcanzar la velocidad máxima de la línea en interestaciones cortas, pero en *Alta Velocidad* el tiempo de recorrido es más sensible a la longitud del tren, como se mostrará en la sección 2.2.4.

En otros se considera constante el rendimiento del equipo de tracción (Rongfang and Golovitcher 2003) en lugar de modelarlo dependiente de la velocidad y/o el esfuerzo (Franke, Terwiesch, and Meyer 2000). Este hecho hace que el cálculo de la energía consumida carezca de elevada precisión, además de que puede llevar a la elección equivocada de unas estrategias de conducción frente a otras.

En otros no se considera la resistencia debida al radio de curvatura (Bocharnikov et al. 2007), lo que no tiene excesiva influencia en *Alta Velocidad*, donde los radios de curvatura son grandes (García et al. 2010).

En (Bocharnikov et al. 2007) se presenta un modelo de optimización basado en simulación para minimizar el consumo energético de un servicio ferroviario alimentado con corriente continua. Su modelo de simulación es detallado, aunque considera al tren como una masa puntual, y tiene en cuenta límites de velocidad, pendientes, curvas de esfuerzo de tracción y freno, freno regenerativo (asumiendo que toda la energía regenerada es consumida por otros trenes) y el tiempo de recorrido objetivo. No obstante, el modelo de simulación utiliza un avance por paso de tiempo discreto de 1 segundo para disminuir el tiempo de cálculo.

2.1.3. RESUMEN Y MARCO DE LA TESIS

El estudio de conducciones manuales eficientes en *Alta Velocidad* requiere alta precisión en el método de cálculo de tiempos de recorrido y consumos energéticos de las conducciones analizadas, ya que los requisitos de puntualidad comprometidos por el operador son muy exigentes, y por otro lado debido a la elevada cantidad de energía que consumen este tipo de trenes, lo que hace que un pequeño porcentaje de ahorro suponga un ahorro económico sustancial. Además, el estudio de conducciones manuales eficientes en *Alta Velocidad* requiere modelos de conducción generales, flexibles y de fácil implementación por parte del maquinista.

La Tabla 2-1 muestra los principales métodos que se han utilizado para diseñar conducciones ferroviarias eficientes en la literatura, en comparación con el que se empleará en la tesis. La mayor parte de los estudios se han basado en métodos analíticos, siendo el más empleado el del principio del máximo de Pontryagin, probablemente debido a ser el primero en utilizarse en este problema.

Dichos métodos requieren en mayor o menor medida simplificaciones en el modelo del tren (esfuerzos de tracción y freno, resistencia al avance, rendimientos), el modelo de la línea (límites de velocidad, pendientes) o del modelo de la propia conducción manual, que es modelada mediante un número reducido de parámetros. Todas estas simplificaciones merman por un lado los resultados de tiempos de recorrido y consumos energéticos de las conducciones, y por otro no permiten explorar ampliamente el espacio de soluciones de conducciones eficientes.

Por ello, el método de optimización empleado en esta tesis será un *Algoritmo Evolutivo* basado en un modelo de simulación detallado que calculará de forma precisa los tiempos de recorrido y consumos energéticos, y que permitirá incorporar fácilmente el modelo específico de conducción manual para líneas de *Alta Velocidad* propuesto en la tesis. Además, los modelos basados en técnicas de búsqueda heurísticas basados en simulación normalmente ofrecen un buen compromiso entre tiempo de ejecución y precisión, siendo especialmente adecuados en sistemas fuertemente no lineales (esfuerzos de tracción/freno, resistencia al avance, rendimientos de tracción y freno eléctrico).

La Tabla 2-2 muestran las principales características del *Algoritmo Evolutivo* basado en simulación que se empleará en la tesis en comparación con otros encontrados en la literatura, donde la diferencia más notable radica en la forma en que se modelarán las conducciones manuales.

En el modelo utilizado en la tesis, cada conducción manual estará completamente definida mediante una serie de consignas de conducción eficiente de alto nivel a implementar en tramos sucesivos del trayecto. Dichas consignas asignarán a cada tramo una estrategia concreta de conducción eficiente, que el maquinista traducirá en la práctica en un valor concreto de solicitud de esfuerzo de tracción/freno en cada punto del recorrido. En concreto, la estructura de conducción consistirá en un conjunto de tramos en que se aplicará la estrategia de regulación sin freno, seguidos por un tramo de deriva final. Esta estructura posibilita incluir otras estrategias como la

regulación de velocidad pura o los ciclos de deriva-remotor sin más que elegir los parámetros adecuados que definen las consignas de conducción.

Con este modelo de conducción manual se consigue un doble objetivo; por un lado utilizar un modelo general a tramos capaz de integrar todas las estrategias de la literatura y explorar el amplio espacio de soluciones, y por otro, gracias a la definición de la conducción mediante consignas de alto nivel, se facilitará la implementación manual de las mismas por parte de los maquinistas, lo que ha sido comprobado en pruebas reales.

Los atributos del algoritmo de optimización serán el tiempo de recorrido y el consumo asociado, y las conducciones obtenidas serán confortables, ya que se simularán marchas con aceleraciones y deceleraciones de servicio suaves propias de los servicios de *Alta Velocidad* (en torno a $0,4 \text{ m/s}^2$).

La Tabla 2-3 muestra las principales características del modelo de simulación que se describirá en la sección 2.2, así como las características modeladas por otros autores. Dada las necesidades de precisión en el cálculo de tiempos de recorrido y consumos energéticos se tendrán en cuenta el rendimiento de tracción y freno eléctrico variables, la longitud del tren, las curvas de tracción y freno reales, el coeficiente de inercias rotativas, el consumo de los equipos auxiliares, el freno regenerativo, los límites de velocidad, las pendientes, el radio de acuerdo entre las mismas, las curvas, los túneles y las pérdidas eléctricas en la catenaria. Pero no solo basta con un modelo de simulación completo y detallado, sino que es necesario un ajuste y validación posterior con medidas reales, lo que también se lleva a cabo en esta tesis, logrando una precisión en los cálculos de tiempos de recorrido y consumos energéticos superior a la de los modelos encontrados en la literatura.

Método	Nombre	Publicaciones	Tesis
Analíticos	Principio del máximo	(Rongfang and Golovitcher 2003),(Howlett 2000),(Ichikawa 1968),(Khmelnitsky 2000),(Bureika, Subacius, and Kumara 2009),(Golovitcher 2001),(Albrecht et al. 2010),(Asnis, Dmitruk, and Osmolovskii 1985a),(Pokorny 2007),(Pokorny 2008),(Asnis, Dmitruk, and Osmolovskii 1985b)	-
	Programación Dinámica	(Miyatake and Ko 2010)(Kuriyama, Yamamoto, and Miyatake 2010)(Katori and Izumi 2008)	-
	Programación Dinámica Discreta	(Franke, Terwiesch, and Meyer 2000),(Franke, Meyer, and Terwiesch 2002),(Kuriyama, Yamamoto, and Miyatake 2010),(Vařak et al. 2009)	-
	Método del Gradiente	(Miyatake and Ko 2010),(Miyatake and Ko 2007),(Ko and Miyatake 2006)	-
	Programación Secuencial Cuadrática	(Miyatake and Matsuda 2009),(Miyatake and Ko 2010)	-
Numéricos	Simulación + Optimización	(De Cuadra et al. 1996)(C. S. Chang and Sim 1997)(Bocharnikov et al. 2007)(Bocharnikov, Tobias, and Roberts 2010)(Lechelle and Mouneimne 2010)(Li et al. 2012)	x

Método	Nombre	Publicaciones	Tesis
	Red Neuronal + Optimización	(Acikbas and Soylemez 2008)(Weidong et al. 2000)	-

Tabla 2-1. Principales técnicas e investigaciones para resolver la conducción óptima.

Algoritmo Evolutivo		Literatura	Tesis
Función objetivo	Consumo	(Seong Ho et al. 1999)	-
	Tiempo y Consumo	(Bocharnikov et al. 2007; Acikbas and Soylemez 2008; Wong and Ho 2004b; Wong and Ho 2004a; Bocharnikov, Tobias, and Roberts 2010)(De Cuadra et al. 1996)	x
	Tiempo, Consumo y Confort	(C. S. Chang and Sim 1997)	-
Modelo de conducciones	Deriva-Remotor	(Bocharnikov et al. 2007; C. S. Chang and Sim 1997; Wong and Ho 2004b; Wong and Ho 2004a; Bocharnikov, Tobias, and Roberts 2010)	x
	Tracción-Deriva-Freno	(De Cuadra et al. 1996) (Acikbas and Soylemez 2008)	x
	Tracción-Regulación-Deriva-Freno	(De Cuadra et al. 1996)(Pokorny 2007)	x
	Tramos de regulación sin freno + Deriva final	-	x
Cálculo del tiempo y consumo	Simulador	(De Cuadra et al. 1996)(Li et al. 2012; C. S. Chang and Sim 1997)	x
	Red Neuronal	(Acikbas and Soylemez 2008)	-

Tabla 2-2. Características del Algoritmo Evolutivo empleado.

Modelo		Publicaciones	Tesis
Rendimiento de tracción y freno eléctrico	Variable	(De Cuadra et al. 1996)(Franke, Terwiesch, and Meyer 2000) (Lechelle and Mouneimne 2010)	x
	Cte.	(Rongfang and Golovitcher 2003)(C. S. Chang and Sim 1997) (Miyatake and Ko 2010)	-
Longitud del tren	No	(De Cuadra et al. 1996)(Franke, Terwiesch, and Meyer 2000)(Bocharnikov et al. 2007)(Khmelnitsky 2000)	-
	Si	(Hee-Soo 1998)(Lechelle and Mouneimne 2010)	X
Curvas de tracción y freno	Simple	(Pudney and Howlett 1994; Howlett 2000; Cheng and Howlett 1992; Howlett and Leizarowitz 2001; Cheng 1997)	-
	Real	(Miyatake and Ko 2010)(Khmelnitsky 2000)	X
Inercias rotativas	No	(Rongfang and Golovitcher 2003)(Bocharnikov et al. 2007)	-
	Si	(Franke, Terwiesch, and Meyer 2000)(Lechelle and Mouneimne 2010)	X
Límites de velocidad	No	(C. S. Chang and Sim 1997)	-
	Si	(Franke, Terwiesch, and Meyer 2000; Rongfang and Golovitcher 2003; Bocharnikov et al. 2007; Acikbas and Soylemez 2008; Hee-Soo 1998; Wong and Ho 2004a; Lukaszewicz 2000; Khmelnitsky 2000)	X
Pendientes	No	(Wong and Ho 2004a)(Pudney and Howlett 1994) (Alves and Pires 2010)	-
	Si	(Franke, Terwiesch, and Meyer 2000)(Rongfang and Golovitcher 2003; Bocharnikov et al. 2007; Acikbas and Soylemez 2008; Chang and Sim 1997; Howlett 1995; Domínguez et al. 2011; Khmelnitsky 2000; Bureika, Subacius, and Kumara 2009; Han et al. 1999; Kuriyama, Yamamoto, and Miyatake 2010)	X

Modelo		Publicaciones	Tesis
Transiciones entre pendientes	No	(De Cuadra et al. 1996)(Franke, Terwiesch, and Meyer 2000; Rongfang and Golovitcher 2003; Bocharnikov et al. 2007; Acikbas and Soylemez 2008; Lechelle and Mouneimne 2010)	-
	Si	(Domínguez et al. 2011)	X
Curvas	No	(Franke, Terwiesch, and Meyer 2000; Bocharnikov et al. 2007)	-
	Si	(Rongfang and Golovitcher 2003; Han et al. 1999)	X
Consumo de equipos auxiliares	No	-	-
	Si	(Acikbas and Soylemez 2008; Lechelle and Mouneimne 2010)	X
Freno regenerativo	No	-	-
	Si	(Bocharnikov et al. 2007; Acikbas and Soylemez 2008; C. S. Chang and Sim 1997; Khmelnsky 2000; Miyatake and Ko 2007)	X
Acumulador embarcado	No	(Franke, Terwiesch, and Meyer 2000; Bocharnikov et al. 2007; Rongfang and Golovitcher 2003)	-
	Si	(Miyatake and Ko 2010; Gunselmann 2005; Domínguez et al. 2012; Kondo 2010; Miyatake and Matsuda 2009)	X
Túneles	No	-	-
	Si	(Franke, Terwiesch, and Meyer 2000; Hee-Soo 1998; Jong and Chang 2005b; Lechelle and Mouneimne 2010)	X

Tabla 2-3. Principales características de los modelos de simulación empleados.

A continuación, la sección 2.2 detallará el modelo de simulación empleado, que será ajustado y validado mediante registros reales en pruebas específicamente diseñadas y en servicios comerciales, llegando a obtener un simulador de gran precisión en el cálculo de tiempos de recorrido y consumos energéticos de conducciones manuales en *Alta Velocidad*. La sección 2.3 se centrará en el *Algoritmo Evolutivo* empleado, con especial atención en el modelo de conducción manual, que permitirá el estudio del amplio espacio de soluciones posibles. Este modelo además estará adaptado para la fácil aplicación manual por parte de los maquinistas.

La sección 2.4 abordará un caso ejemplo de diseño de conducciones eficientes a lo largo de trayectos en servicios de *Alta Velocidad* reales que posteriormente fueron implementadas y medidas para obtener el ahorro real respecto a las conducciones típicas realizadas por los maquinistas.

Por último, en la sección 2.5 se resumirán las conclusiones y aportaciones alcanzadas en el capítulo.

2.2. MODELO DE SIMULACIÓN

En esta sección se detallará el modelo de simulación empleado para el cálculo de tiempos de recorrido y consumos energéticos de conducciones manuales en trayectos de *Alta Velocidad*. La sección 2.2.1 describirá los modelos de tren, línea y conducción manual, y la sección 2.2.2 detallará el funcionamiento del simulador. Posteriormente se describirá el ajuste y validación del simulador mediante medidas reales obtenidas en pruebas tanto en ensayos nocturnos como durante servicios comerciales (sección 2.2.3). Finalmente se realizará un análisis de los resultados obtenidos (sección 2.2.4).

Es esencial llegar a un compromiso entre la complejidad y grado de detalle del modelo de simulación y el tiempo de ejecución que requerirá simular una conducción (Law and Kelton 2000). Para reducir al máximo el tiempo de ejecución se empleará un avance del reloj de simulación combinado entre el paso discreto y el evento discreto (Goodman, Siu, and Ho 1998).

La simulación de una conducción manual reproducirá la marcha de un determinado tren a lo largo de un trayecto de una línea ejecutando una determinada lista de consignas manuales de conducción. Por tanto, se pueden identificar tres módulos independientes en el modelo de simulación: el modelo de tren, de la línea y de la conducción manual.

Se define marcha de un trayecto ferroviario como el conjunto formado por un tren, una línea y una conducción manual a lo largo del trayecto (lista de consignas). De esta manera, dos marchas distintas en un mismo trayecto y con el mismo tren solo se diferenciarán en la conducción manual implementada a lo largo del mismo, por lo que en el presente documento se utilizará el término conducción manual para referirse tanto a la marcha como a la propia conducción manual.

Cada simulación de una marcha estará caracterizada por su tiempo de recorrido y consumo energético, y estará definida por un conjunto de estrategias de conducción eficientes a implementar a lo largo del trayecto. Dichas estrategias constituirán unas pautas de alto nivel que permitirán determinar en cada momento el esfuerzo de tracción o freno a aplicar, de manera que el balance de fuerzas instantáneo del tren podrá ser expresado mediante la ecuación 2.3.

$$\sum F = F + F_{ext} = F + F_a + F_p + F_r \quad 2.3$$

Siendo $\sum F$ el sumatorio de fuerzas que actúa sobre el tren, F el esfuerzo instantáneo del motor y F_{ext} el conjunto de las fuerzas externas que actúan sobre el tren, compuesta por la fuerza de resistencia al avance (F_a), la fuerza de resistencia debida a la pendiente (F_p) y la fuerza de resistencia debida al radio de curvatura (F_r).

Conociendo el balance de fuerzas instantáneo es posible obtener la aceleración instantánea del tren aplicando la segunda ley de Newton, mostrada en la ecuación 2.4.

$$a = \frac{\sum F}{m_i} \quad 2.4$$

Siendo a la aceleración instantánea del tren, $\sum F$ el sumatorio de fuerzas que actúa sobre el mismo, obtenido con la ecuación 2.3, y m_i la masa inercial del tren, definida en la ecuación 2.21.

En caso de que se determine en primer lugar el valor de aceleración, como por ejemplo en las curvas de freno con deceleración de servicio, el valor de esfuerzo que aplicará el tren se obtendrá despejándolo de la ecuación 2.4, como indica la ecuación 2.5.

$$F = m_i \cdot a - F_{ext} \quad 2.5$$

Siendo F el esfuerzo instantáneo del motor, m_i la masa inercial del tren, a la aceleración instantánea del tren y F_{ext} el conjunto de las fuerzas externas que actúan sobre el tren.

Conociendo la aceleración del tren en cada instante de la marcha es posible obtener el perfil de velocidad, el tiempo de recorrido y el consumo energético asociados a la conducción manual. El proceso completo se detallará en las siguientes secciones.

A continuación se describe cada uno de los tres modelos asociados a una marcha: la línea, el tren y la conducción manual, que son fundamentales para que el modelo de simulación alcance la precisión deseada.

2.2.1. MODELOS DE LÍNEA, TREN Y CONDUCCIÓN MANUAL

Esta sección detallará cada uno de los módulos de entrada del modelo de simulación. En primer lugar se listarán los elementos que constituyen cada uno de ellos.

Línea

El modelo la línea contendrá toda la información de la línea relevante para el cálculo del tiempo de recorrido y el consumo energético de forma precisa. Los principales datos de línea, que serán descritos en detalle más adelante, son los siguientes.

- **Puntos de Control:** Son los puntos de referencia horaria a lo largo del recorrido. Se definen mediante los campos nombre, punto kilométrico, hora de paso de la conducción comercial y hora de paso de la conducción a marcha tendida.
- **Límites de velocidad permanentes:** Son los límites de velocidad máxima permitida o límites civiles. Se definen mediante listados cuyos campos son el punto kilométrico y la velocidad del límite permanente.
- **Límites de velocidad temporales:** Son limitaciones de velocidad que afectan al trayecto de forma temporal por diferentes motivos. Se definen mediante listados cuyos campos son el punto kilométrico inicial, el punto kilométrico final y la velocidad del límite temporal.
- **Trazado en alzado:** Es el perfil longitudinal de la línea, definido mediante un listado de pendientes y rampas a lo largo del mismo. Sus atributos son el punto kilométrico, la pendiente y el parámetro que define la transición entre la pendiente actual y la siguiente.
- **Trazado en planta:** Define la localización de las curvas de la línea mediante un listado con los campos punto kilométrico, el tipo de elemento de trazado (recta, curva o clotoide) y el parámetro que caracteriza a dicho elemento, que será nulo en el caso de recta, el valor del radio de curvatura en el caso de curva, y el parámetro de la clotoide propiamente dicho en el caso de clotoide.

- **Zonas neutras:** Las zonas neutras son aquellos tramos de la línea que carecen de alimentación eléctrica, y se definen mediante un listado con los campos Punto kilométrico inicial y Punto kilométrico final.
- **Túneles:** La posición de los túneles de la línea se define mediante un listado con los campos Punto kilométrico inicial, Punto kilométrico final y Factor de túnel, que incrementará la resistencia aerodinámica.
- **Pérdidas en catenaria:** Las pérdidas en la catenaria dependerán de la distancia entre la subestación que alimenta al tren y el mismo tren, y se definirán mediante un listado con los campos punto kilométrico de cambio de tramo alimentado por una subestación y punto kilométrico de localización de la subestación.
- **Aprovechamiento de la energía regenerada:** El aprovechamiento de la energía regenerada tiene en cuenta el rendimiento de aprovechamiento de la energía que se genera con el freno eléctrico regenerativo en la subestación donde esta energía es enviada. Cada subestación tendrá asociado su propio factor de aprovechamiento.

Tren

El modelo del tren incluirá los elementos necesarios para caracterizar el material rodante empleado en la simulación de manera precisa, que estarán clasificados en cuatro categorías diferentes.

- **Físicas:** Las características físicas que se utilizarán para el modelo del tren son longitud, masa, coeficiente de inercias rotativas y masa inercial.
- **Motor:** Son los parámetros del motor eléctrico que se incluyen en el modelo del tren. Incluyen la curva de esfuerzo de tracción máximo, la curva de esfuerzo de freno eléctrico máximo, el esfuerzo máximo de freno neumático, la potencia nominal de tracción, la potencia nominal de freno eléctrico y la potencia nominal de los equipos auxiliares.
- **Fuerzas resistentes:** Son el conjunto de fuerzas que se oponen al avance del tren: la resistencia al avance, la resistencia debida a la pendiente y la resistencia debida al radio de curvatura.
- **Consumo:** El modelo de consumo estará caracterizado por el rendimiento de tracción y el rendimiento del freno eléctrico.

Conducción manual

El modelo de la conducción manual es esencial ya que supone el objeto de estudio para el que se construye el presente simulador. Cada conducción manual estará completamente definida mediante una serie de consignas de conducción eficiente a implementar en tramos sucesivos del trayecto (Sicre et al. 2011). Dichas consignas asignarán a cada tramo una estrategia concreta de conducción eficiente, que se traducirá en la práctica en un valor concreto de esfuerzo de tracción/freno en cada punto del recorrido.

Definiendo de esta manera el modelo de conducción manual se consigue un doble objetivo; por un lado utilizar un modelo general a tramos capaz de integrar todas las estrategias de la literatura, y por otro, gracias a la definición de la conducción mediante consignas de alto nivel, se facilitará la implementación manual de las mismas por parte de los maquinistas.

En esta sección se hace mayor hincapié en el modelo de conducción empleado, mientras que en la sección 2.2.4 se analizarán las diferentes estrategias de conducción eficientes disponibles para decidir más en concreto la estructura final de las conducciones que se utilizarán en el *Algoritmo Evolutivo* empleado en la sección 2.3.

La lista de consignas de conducción manual a lo largo de un trayecto comprende los campos Punto kilométrico inicial, Punto kilométrico final, Tipo de consigna y Velocidad de la consigna.

A continuación se detallan en profundidad cada uno de los modelos: línea, tren y conducción manual.

2.2.1.1. MODELO DE LA LÍNEA

En el modelo de la línea se definirán todas aquellas características con influencia en el tiempo de recorrido y en el consumo energético de una marcha, además de las características operativas que definen el servicio concreto sobre el que se diseñarán las conducciones eficientes. Por otro lado, en este modelo también se guardarán las horas de paso resultantes de la marcha simulada.

Puntos de Control

La tabla de puntos de control define el horario comercial del trayecto, es decir, las horas a las que el tren debería pasar por una serie de puntos de referencia o puntos de control a lo largo del trayecto para garantizar la puntualidad del servicio. Es análoga a la *Hoja de Ruta* que los maquinistas utilizan para controlar la puntualidad del mismo (Figura 1-10). Dicha tabla contendrá un número N_{pc} de puntos de control, cada uno de ellos definido con los siguientes campos:

- Nombre del punto de control pc_i : Este campo únicamente se emplea para la presentación de resultados, e indica el nombre del punto de control i .
- Punto kilométrico $X_{pc,i}$ (m): Indica la posición del punto de control i .
- Tiempo de paso de la conducción comercial $T_{pc,i}$ (s): Indica la hora de paso por el punto de control i según la hoja de ruta del servicio comercial.
- Tiempo de paso de la conducción a marcha tendida $T_{pct,i}$ (s): aunque este campo no está incluido en las Hojas de Ruta que emplean los maquinistas, se ha añadido por su utilidad para el cálculo de márgenes de tiempo disponible para recuperación de retrasos, como se detallará posteriormente. Indica la hora a la que pasaría el tren por el punto de control i si recorriera todo el trayecto a marcha tendida.


<div style="text-align: center;"> Hoja de Ruta MALLAS </div> <div style="text-align: right;">  </div>											
<div style="text-align: center;"> Documento válido para el día: 25 Nov 09 </div>											
<div style="text-align: center;"> Tren: 03063 AVE Origen: PTA. DE ATOCHA Destino: BARNA-SANTS </div>											
C	Tipo de	Sit	Vel	Dependencia	A	Para	P	Horas	Para	Tmpo	C.
A	bloqueo	Klm	max	Precaución	S	Com	e	Sal-Pas	Tec	Conc	Rad
T					F		f				
		419.9		VALLMANYA.....	1			8:22		5.0	
		430.3		MONTAGUT-A.V.....	1			8:24.3		2.3	
		434.6		BIF LES TORRES.....	1			8:25.3		1.0	
	' BSL '	439.9	300	EL SEGRE.....	1			8:27		1.3	(G)
		449.0		BIF ARTESA LLEID.....	1			8:29		2.0	
		451.8		BIF CBDOR PUIGVE.....	1			8:30.3		1.3	
		456.6		LES BORGES-A.V.....	1			8:32		1.3	
		482.6		KM. 482,6.....	1			8:38		6.0	
		488.9		L'ESPLUGA F-A.V.....	1			8:39		1.0	
		509.3		ALCOVER-A.V.....	1			8:45		6.0	
		520.9		CAMP TARRAGONA.....	1			8:48		3.0	
		533.2		BIF CBDOR RODA.....	1			8:51		3.0	
		534.7		POBLA MONTORNES.....	1			8:51.3		0.3	
		552.7		L'ARBOÇ-A.V.....	1			8:55.3		4.0	
		565.7		VILAFRANCA-A.V.....	1			8:58.3		3.0	
		579.6		GELIDA-A.V.....	1			9:02		3.3	
		583.6		KM. 583,639.....	1			9:03.3		1.3	
		591.9	245	KM. 591,865.....	1			9:06.3		3.0	
		602.1		S. VICENÇ HORTS.....	1			9:10		3.3	
		604.2	225	KM. 604,166.....	1			9:11.3		1.3	
		607.2		KM. 607,225.....	1			9:13		1.3	
		612.9	170	PRAT LLOBREGT-AV.....	1			9:16.3		3.3	
		615.0	135	KM. 614,997.....	1			9:18.3		2.0	
		615.7		BIF. C. TUNIS-AV.....	1			9:20		1.3	
		618.1	105	KM. 618,069.....	1			9:22.3		2.3	
		621.0	085	BARNA-SANTS.....	1			9:27		4.3	

Figura 2-10. Hoja de Ruta del servicio 3063 utilizada por los maquinistas durante un servicio comercial para controlar la puntualidad del mismo. Fuente: Adif.

Los campos de hora de paso de la conducción comercial y hora de paso de la conducción a marcha tendida no son datos de entrada, sino que se obtienen una vez simulada la marcha.

Límites de velocidad permanentes

Los límites de velocidad permanentes (también llamados límites civiles) definen la velocidad máxima permitida en cada punto de la línea, ya sea por motivos de infraestructura o señalización. Cada trayecto constará de un número N_{lp} de límites de velocidad permanentes, cada uno de ellos compuesto por los siguientes campos:

- Punto kilométrico $X_{lp,i}$ (m): Indica la posición a partir de donde comienza a afectar el límite de velocidad permanente i . Todo punto de la línea deberá estar gobernado por un límite de velocidad permanente.
- Velocidad $V_{lp,i}$ (km/h): Indica el valor de velocidad máxima del límite de velocidad permanente i , que afectará desde el punto kilométrico del actual límite de velocidad permanente hasta el punto kilométrico del siguiente.

La Figura 2-11 muestra la representación gráfica de los límites permanentes en el trayecto Madrid-Zaragoza, donde se puede apreciar que todo punto del recorrido está gobernado por un límite de velocidad permanente. Dicha figura muestra también el perfil de la línea en trazo verde.

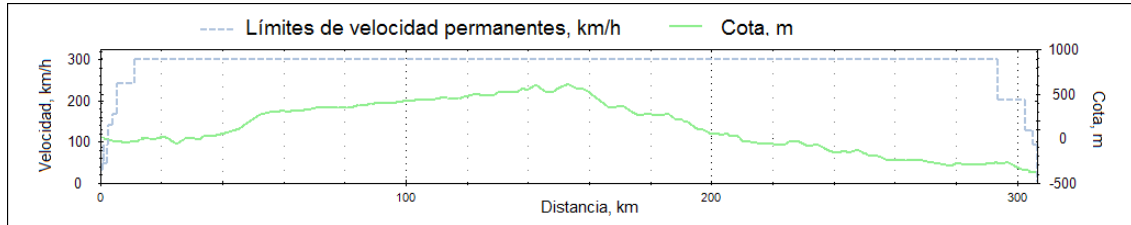


Figura 2-11. Límites de velocidad permanentes en la línea de *Alta Velocidad* Madrid-Zaragoza.

Límites de velocidad temporales

Los límites de velocidad temporales definen, con carácter transitorio, tramos de vía en los que no está permitido rebasar una determinada velocidad, que será inferior al límite de velocidad permanente en dichos tramos. Los límites de velocidad temporales pueden ser causados por diversos motivos, como obras o vientos fuertes. Cada trayecto contendrá un número N_{lt} de límites de velocidad temporales formado por los siguientes campos:

- Punto kilométrico inicial $X_{lti,i}$ (m): Indica el inicio del tramo del límite de velocidad temporal i .
- Punto kilométrico final $X_{ltf,i}$ (m): Indica el final del tramo del límite de velocidad temporal i .
- Velocidad $V_{lt,i}$ (km/h): Indica el valor de velocidad máxima del límite de velocidad temporal i .

Trazado en alzado

El trazado en alzado contendrá la información necesaria para caracterizar el perfil de la línea mediante la pendiente en cada punto del trayecto. Al igual que con los límites de velocidad permanentes, todo punto de la línea estará caracterizado por un valor de pendiente.

El trazado en alzado es un elemento fundamental del modelo de la línea, ya que las pendientes influirán de manera muy notable en las fuerzas externas que actúan sobre el tren, y por lo tanto en el tiempo de recorrido y consumo energético.

El alzado de la línea no se modelará únicamente como una sucesión de tramos de diferente pendiente, sino que se incorporarán al modelo las transiciones o acuerdos entre las mismas mediante arcos de parábola de segundo grado y eje vertical. Dichas parábolas serán definidas por el radio de curvatura en el vértice mediante el parámetro KV , según la ecuación 2.6 (Figura 2-12).

$$Z = \frac{X^2}{2 \cdot KV} \quad 2.6$$

Siendo Z la cota a añadir al punto de tangencia, X la distancia medida en horizontal desde dicho punto de tangencia ($xt_{i-1,2}$ en la Figura 2-12), y KV el parámetro que modela la transición entre pendientes.

De esta manera, la transición entre dos pendientes adyacentes se modela mediante una curva de transición progresiva entre una pendiente y la siguiente, que será más suave cuanto mayor sea el parámetro de acuerdo KV que defina dicha transición (Figura 2-12).

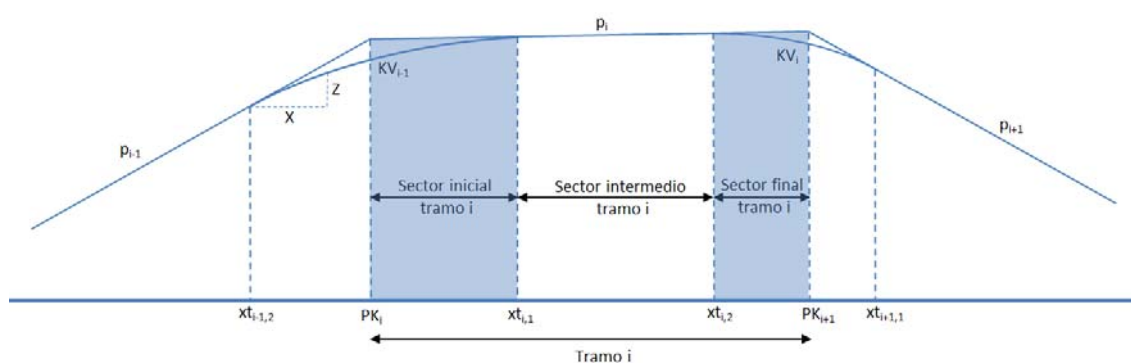


Figura 2-12. Modelo del trazado en alzado mediante transiciones o acuerdos verticales entre pendientes definidos por el parámetro KV .

Cada tramo de pendiente i estará compuesto por 3 sectores y la pendiente será calculada de manera diferente en cada uno de ellos:

- Sector inicial ($PK_i \leq s \leq xt_{i,1}$): En este primer sector la pendiente será variable, fruto de la transición del tramo de pendiente actual (i) con el anterior ($i - 1$), y dependerá del valor relativo entre las dos pendientes, según muestra la ecuación 2.7.

$$p = \begin{cases} \frac{p_i - \theta_1 \cdot (xt_{i,1} - s)}{2 \cdot (xt_{i,1} - PK_i)} & \text{si } p_{i-1} \leq p_i \\ \frac{p_i + \theta_1 \cdot (xt_{i,1} - s)}{2 \cdot (xt_{i,1} - PK_i)} & \text{si } p_{i-1} > p_i \end{cases} \quad 2.7$$

Siendo p el valor de la pendiente en s , p_i el valor de pendiente en el tramo i , $xt_{i,1}$ la posición del punto de tangencia entre el tramo de pendiente actual y la curva de transición con el tramo de pendiente anterior, PK_i la posición del punto de control i , s la posición donde se está calculando la pendiente y θ_1 el valor absoluto de la diferencia entre la pendiente del tramo actual y del anterior, según indica la ecuación 2.8.

$$\theta_1 = |p_{i-1} - p_i| \quad 2.8$$

Siendo θ_1 el valor absoluto de la diferencia entre la pendiente del tramo actual y del anterior, p_{i-1} la pendiente del tramo anterior y p_i el valor de la pendiente del tramo actual.

- Sector intermedio constante ($xt_{i,1} \leq s \leq xt_{i,2}$): En este segundo sector el valor de la pendiente será constante según la ecuación 2.9.

$$p = p_i \quad 2.9$$

Siendo p el valor de la pendiente y p_i el valor de la pendiente del tramo actual.

- Sector final ($xt_{i,2} \leq s \leq PK_{i+1}$): El sector final también tendrá pendiente variable, fruto de la transición del tramo de pendiente actual (i) con el siguiente ($i + 1$), y dependerá del valor relativo entre dichas pendientes según la ecuación 2.10.

$$p = \begin{cases} \frac{p_i + \theta_2 \cdot (s - xt_{i,2})}{2 \cdot (PK_{i+1} - xt_{i,2})} & \text{si } p_i \leq p_{i+1} \\ \frac{p_i - \theta_2 \cdot (s - xt_{i,2})}{2 \cdot (PK_{i+1} - xt_{i,2})} & \text{si } p_i > p_{i+1} \end{cases} \quad 2.10$$

Siendo p el valor de la pendiente en s , p_i el valor de pendiente en el tramo i , $xt_{i,2}$ la posición del punto de tangencia entre el tramo de pendiente actual y la curva de transición con el tramo de pendiente siguiente, PK_{i+1} la posición del punto de control $i + 1$, s la posición donde se está calculando la pendiente y θ_2 el valor absoluto de la diferencia entre la pendiente del tramo actual y del siguiente, según indica la ecuación 2.11.

$$\theta_2 = |p_i - p_{i+1}| \quad 2.11$$

Siendo θ_2 el valor absoluto de la diferencia entre la pendiente del tramo actual y del siguiente, p_{i+1} la pendiente del tramo siguiente y p_i el valor de la pendiente del tramo actual.

Las pendientes de un trayecto serán un conjunto N_{pend} que contendrá los siguientes campos:

- Punto kilométrico $X_{p,i}$ (m): Indica la posición a partir de donde comienza a afectar un nuevo tramo de pendiente. El punto kilométrico de la primera pendiente deberá comenzar en el punto kilométrico del primer punto de control.
- Pendiente p_i (mm/m): Indica el valor de la pendiente del tramo. Este valor es equivalente al cociente entre la distancia vertical ascendida o descendida en 1000 m de recorrido horizontal (Figura 2-13). Por convención, se considera que una pendiente ascendente es positiva, y se denominará rampa. Por el

contrario, una pendiente descendente será negativa, y se denominará pendiente propiamente dicha.

- Parámetro de acuerdo entre pendientes KV_i : Este parámetro define el radio de acuerdo entre los tramos de pendiente i e $i + 1$.

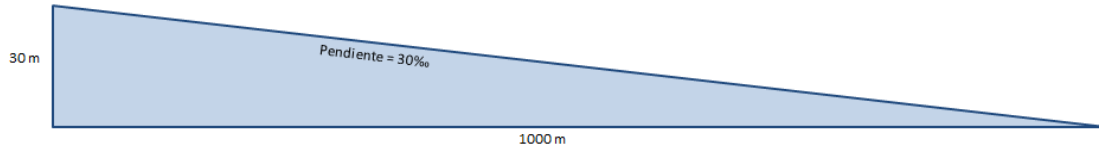


Figura 2-13. Pendiente.

La Figura 2-14 muestra la variación progresiva de la pendiente a lo largo del trayecto Madrid-Guadalajara al modelar el alzado de la línea utilizando curvas de transición entre pendientes, donde la cota se refiere a la altura respecto al nivel del mar.

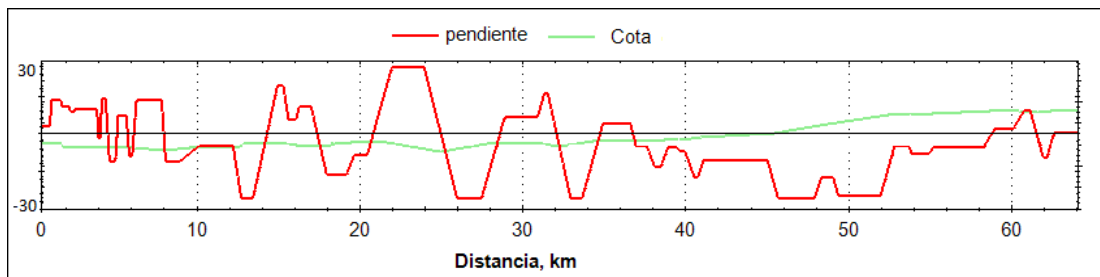


Figura 2-14. Trazado en alzado mediante tramos de pendiente constante unidos por curvas de transición en la línea de *Alta Velocidad* Madrid-Guadalajara.

Para apreciar la diferencia entre modelar el trazado en alzado de la línea con transiciones de pendiente o sin ellas, la Figura 2-15 muestra un detalle del perfil de la línea de *Alta Velocidad* Madrid-Zaragoza a su paso por Medinaceli utilizando las curvas de transición reales entre pendientes y sin utilizarlas.

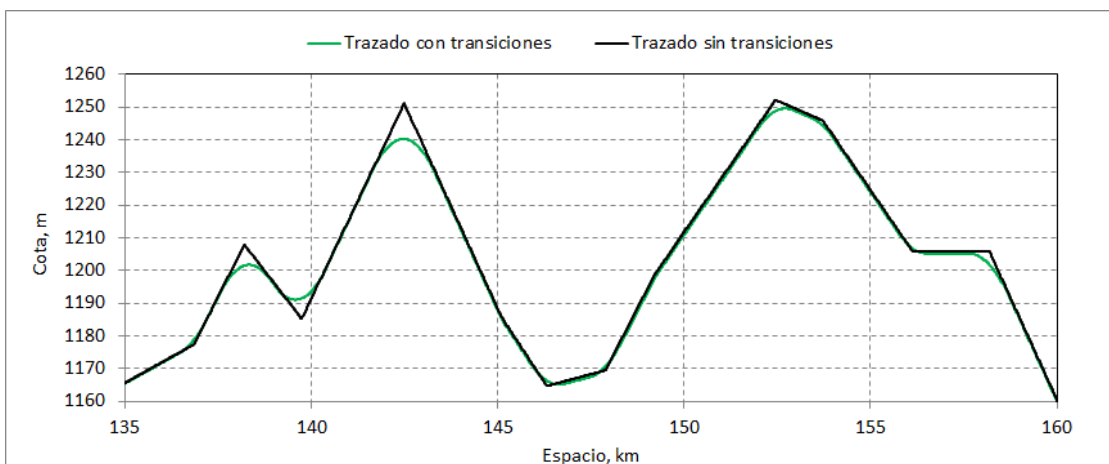


Figura 2-15. Detalle de la línea de *Alta Velocidad* Madrid-Zaragoza a su paso por Medinaceli, modelada con y sin transiciones entre pendientes.

Trazado en planta

El trazado en planta contiene la información relativa al radio de curvatura en cada punto de la línea, y es incluido en el modelo de la línea ya que el radio de curvatura origina la fuerza de resistencia al paso por curva o resistencia debida al radio de curvatura, que será una de las tres fuerzas externas que se oponga al movimiento del tren.

Son tres los elementos o tramos utilizados en la construcción de una línea; tramos rectos, tramos en curva (radio de curvatura constante) y clotoides (radio de curvatura variable). La Figura 2-16 muestra la representación gráfica del trazado en planta de la línea de *Alta Velocidad* Madrid-Zaragoza.

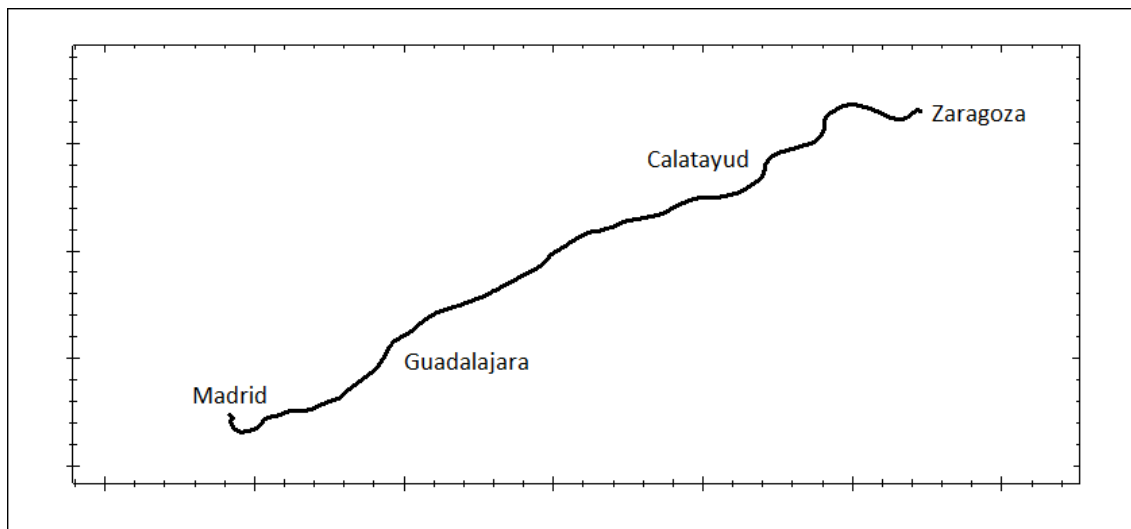


Figura 2-16. Trazado en planta mediante tramos de recta, curva y clotoide, trayecto Madrid-Zaragoza.

Las clotoides son tramos curvos cuyo radio de curvatura varía a lo largo de la longitud de la misma, y se emplean para unir dos tramos de vía entre sí de manera que la aceleración centrífuga experimentada al recorrerla varíe suavemente, lo que mejora el confort del viajero y contribuye a la conservación de los raíles de la vía. Se suelen emplear para unir un tramo recto con uno de radio de curvatura constante, donde el radio de curvatura variará desde infinito en el punto de tangencia con la recta, hasta el valor del radio del tramo con curvatura constante (Figura 2-17). Las clotoides quedarán definidas mediante el valor de su parámetro C_r , definido en la ecuación 2.12.

$$r = \frac{C_r^2}{x} \quad 2.12$$

Siendo r el radio de curvatura, C_r el parámetro de la clotoide y x la distancia recorrida a lo largo de la misma.

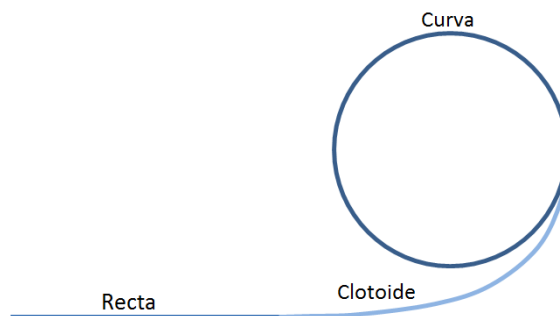


Figura 2-17. Clotoide entre un tramo recto y uno de radio de curvatura constante.

El trazado en planta estará formado por N_{curv} tramos, cada uno de ellos definido por los siguientes campos:

- Punto kilométrico $X_{c,i}$ (m): Indica la posición a partir de donde comienza a afectar el tramo de curva correspondiente. El punto kilométrico de la primera curva comenzará en el punto kilométrico del primer punto de control de la línea.
- Elemento de trazado c_i : Este campo indica el tipo de elemento de trazado en planta (recta, curva o clotoide).
- Parámetro $C_{r,i}$ (m): El parámetro del tramo corresponderá al radio de curvatura en el caso de que éste sea una curva, o al parámetro de la clotoide. En el caso de que el tramo sea una recta, el parámetro tendrá un valor nulo.

Zonas Neutras

Las zonas neutras son tramos sin alimentación eléctrica, utilizados para separar las fases en corriente alterna. En las líneas de *Alta Velocidad* españolas las subestaciones eléctricas se localizan en zonas neutras alternativas, de manera que cada subestación alimenta a dos tramos eléctricos, como puede observarse en la Figura 2-18.

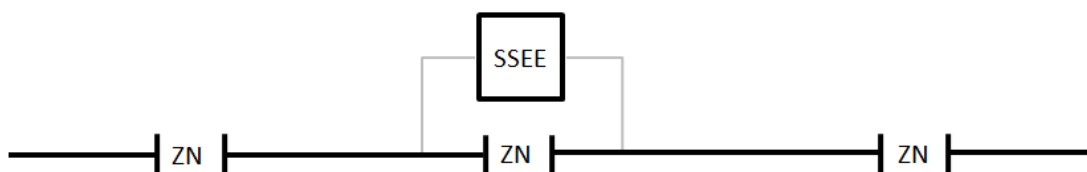


Figura 2-18. Esquema de alimentación eléctrica simplificado en las líneas de *Alta Velocidad* españolas.

Durante las zonas neutras el motor no podrá suministrar esfuerzo de tracción ni se podrá inyectar energía a la red procedente del frenado regenerativo.

El conjunto de zonas neutras estará formado por un número N_{zn} de elementos, cada uno de ellos formado por los siguientes campos:

- Punto kilométrico inicial $X_{zni,i}$ (m): Indica la posición de inicio de la zona neutra.
- Punto kilométrico final $X_{znf,i}$ (m): Indica la posición del final de la zona neutra.

Túneles

Los túneles tienen una influencia notable en la resistencia al avance que experimenta un tren al atravesarlos, y por lo tanto se han incluido en el modelo de la línea. Los túneles estarán formados por un conjunto de N_{tun} elementos, cada uno de ellos definido por los siguientes campos:

- Punto kilométrico inicial $X_{tuni,i} (m)$: Indica la posición de inicio del túnel.
- Punto kilométrico final $X_{tunf,i} (m)$: Indica la posición del final del túnel.
- Factor del túnel $f_{tun,i}$: El factor de túnel será un valor mayor que 1, e incrementará la resistencia al avance del tren (ecuación 2.24).

Pérdidas en catenaria

Las pérdidas eléctricas en la catenaria (η_{cat}) se tendrán en cuenta para calcular el consumo energético total en subestación. Para ello, se considerará constante la tensión en catenaria durante toda la simulación, de tal forma que la potencia de pérdidas se calculará mediante la ecuación 2.13.

$$P_{cat} = R(x) \cdot I^2 \quad 2.13$$

Siendo P_{cat} la potencia de perdidas eléctricas en catenaria, I la intensidad instantánea que circula por la misma y $R(x)$ la resistencia instantánea equivalente entre la subestación y el tren, que se modelará según la ecuación 2.14.

$$R(x) = k \cdot x \quad 2.14$$

Siendo $R(x)$ la resistencia instantánea equivalente entre la subestación y el tren, x la distancia entre el tren y la subestación que le esté alimentando y k una constante, que dependerá de la configuración del sistema de alimentación. En la tesis se tomará como referencia una catenaria bitensión para una configuración con Feeder positivo LA-180, Feeder negativo LA-280, sustentador de 100 mmCu, hilo de contacto de 150 mm Cu60%, cable de retorno LA-180 y raíl UIC-60. Para este sistema, la matriz de impedancias (conductores equivalentes) será la indicada en la ecuación 2.15, (Pilo 2003).

$$Z = \begin{pmatrix} 0,61082 + 1,7641j & 0,26192 + 0,91045j \\ 0,26192 + 0,91045j & 0,93886 + 2,7680j \end{pmatrix} \cdot 10^{-4} \Omega / m \quad 2.15$$

Aplicando la fórmula de impedancia equivalente por unidad de longitud de la catenaria bitensión (ecuación 2.16), el valor de la constante k de la ecuación 2.14 será $k = 2,8 \cdot 10^{-5} \Omega/m$.

$$\tilde{z}_{eq,cat} = \frac{\tilde{z}_{11} \tilde{z}_{22} - \tilde{z}_{12} \tilde{z}_{21}}{\tilde{z}_{11} + \tilde{z}_{22} + \tilde{z}_{12} + \tilde{z}_{21}} \quad 2.16$$

Siendo $\tilde{Z}_{eq,cat}$ la impedancia equivalente por unidad de longitud y $\tilde{Z}_{i,j}$ el elemento de la fila i y la columna j en la matriz de impedancias de la ecuación 2.15.

Por otro lado, para calcular la intensidad instantánea I que circula por la catenaria se aplicará la ecuación 2.17.

$$I = \frac{P_e}{U \cdot \cos \theta} \quad 2.17$$

Siendo I la intensidad instantánea que circula por la catenaria, P_e la potencia activa instantánea solicitada por el tren en pantógrafo, U la tensión en catenaria y $\cos \theta$ el factor de potencia de la línea, que se considerará constante a lo largo de toda la simulación.

En las líneas de *Alta Velocidad* españolas cada subestación eléctrica suele alimentar dos tramos eléctricos, separados entre ellos por una zona neutra. De esta manera, el modelo de pérdidas en catenaria contendrá un conjunto de N_{pcat} elementos, cada uno de ellos definido por los siguientes campos:

- Punto kilométrico $X_{pcat,i}$ (m): Indica la posición a partir de donde empieza a alimentar la subestación eléctrica i . Este punto coincidirá con el fin de una zona neutra, y el punto kilométrico del primer elemento deberá ser igual al punto kilométrico del primer punto de control.
- Punto kilométrico $X_{SE,i}$ (%): Indica la posición de la subestación eléctrica i .

Las pérdidas en catenaria se calculan tanto para la energía consumida por el tren como para la energía regenerada por el mismo. Dado que la capacidad de las mallas de *Alta Velocidad* aún está lejos de la saturación y los períodos de paso entre trenes son relativamente elevados, se considerará que la energía regenerada por el tren durante los procesos de frenado será transportada a la subestación que le esté alimentando en cada momento y allí será inyectada a la red de distribución y aprovechada en otros puntos de consumo.

Aprovechamiento de la energía regenerada

En las líneas de *Alta Velocidad* alimentadas en corriente alterna toda la energía regenerada, una vez en subestación, podrá ser aprovechada en otros puntos de consumo. No obstante, se considerará un rendimiento de aprovechamiento de dicha energía en cada subestación, con el fin de dotar de mayor flexibilidad al modelo de la línea, de manera que se definirán un total de N_{areg} elementos, cada uno de ellos definido por los siguientes campos:

- Punto kilométrico $X_{areg,i}$ (m): Indica la posición a partir de donde comienza a alimentar una nueva subestación eléctrica. El punto kilométrico del primer elemento deberá ser igual al punto kilométrico del primer punto de control.

- Rendimiento de aprovechamiento $\eta_{areg,i}$ (%): Indica el rendimiento de aprovechamiento de la energía regenerada en la subestación eléctrica correspondiente.

La energía regenerada durante los procesos de frenado sufrirá por tanto tres pérdidas de diferente naturaleza: las debidas al rendimiento del freno eléctrico regenerativo al transformar la energía mecánica en eléctrica (η_e), las asociadas al transporte a lo largo de la catenaria (η_{cat}) y las debidas al aprovechamiento que de ella se haga en la subestación (η_{areg}). Estas pérdidas se muestran gráficamente en el diagrama de Sankey de la Figura 2-19.

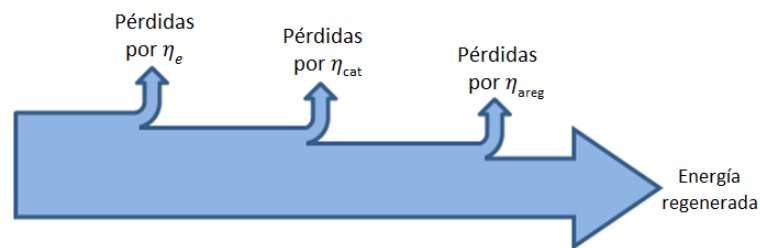


Figura 2-19. Pérdidas de la energía regenerada.

No obstante, debido a la falta de medidas para ajustar el valor de aprovechamiento de la energía regenerada en subestación y dado que al regenerar la energía directamente en corriente alterna se facilita su inyección directa a la red de distribución, se considerará que el valor de dicho factor será 1 en todas las simulaciones.

2.2.1.2. MODELO DEL TREN

El modelo del tren será esencial para calcular de forma precisa el tiempo de recorrido y consumo energético de una conducción manual en *Alta Velocidad*. A continuación se detalla cada uno de los elementos que componen el modelo del tren.

Físicos

Los elementos físicos del tren son la longitud, la masa, el coeficiente de inercias rotativas y la masa inercial.

Longitud L

El tren no se ha modelado como una masa puntual, sino como una masa uniformemente distribuida a lo largo de su longitud, lo cual influirá en el cálculo de la pendiente, los límites de velocidad máxima y el radio de curvatura.

- Pendiente

Al considerar la longitud del tren, el valor de la pendiente equivalente ya no será la correspondiente al centro de masas del mismo como correspondería a un modelo de tren de masa puntual, sino que se tomará un valor ponderado entre todas las pendientes que afecten al tren en cada instante según el número de sectores que esté ocupando (Figura 2-20).

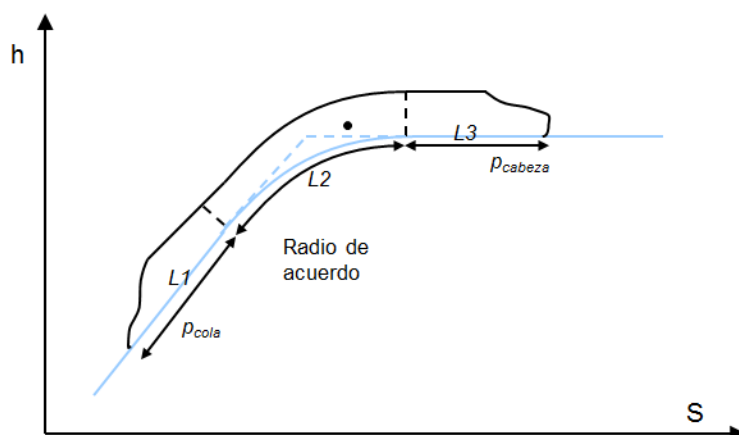


Figura 2-20. Pendiente media que afecta al tren.

Para el caso del ejemplo de la Figura 2-20 en que el tren está ocupando parte del sector recto de un tramo de pendiente, la totalidad del sector de transición y parte del sector recto siguiente, la pendiente instantánea sería la indicada en la ecuación 2.18.

$$p = \frac{p_{cabeza} \cdot L_3 + \frac{p_{cola} + p_{cabeza}}{2} \cdot L_2 + p_{cola} \cdot L_1}{L_1 + L_2 + L_3} \quad 2.18$$

Siendo p la pendiente instantánea global del tren (que se utilizará para hallar la resistencia debida a la pendiente), p_{cabeza} la pendiente en la cabeza, p_{cola} la pendiente en la cola, y L_1, L_2 y L_3 las longitudes de cada uno de los tres sectores de pendiente sobre los que se encuentra el tren.

Teniendo en cuenta que la longitud media de los tramos de pendiente construidos en las líneas ferroviarias de *Alta Velocidad* es considerablemente mayor que la longitud del tren (en el tramo Madrid-Zaragoza la longitud media del tramo de pendiente es de 1640 m, mientras que la longitud máxima de los trenes empleados en su configuración doble es de 400 m), se podrán dar doce casos diferentes según la posición en que se encuentre la cabeza del tren (Figura 2-21):

- Cabeza del tren situada en el sector final del tramo ($PK_i \leq s \leq xt_{i,1}$): En este caso la cola del mismo podrá estar situada en cada uno de los tres sectores del tramo actual o en los sectores intermedio y final del tramo anterior (5 opciones).
- Cabeza del tren situada en el sector intermedio del tramo ($xt_{i,1} \leq s \leq xt_{i,2}$): En este caso la cola podrá estar situada en uno de los dos primeros sectores del tramo actual, o en los dos sectores finales del tramo anterior (4 opciones).
- Cabeza del tren situada en el sector inicial del tramo ($xt_{i,2} \leq s \leq PK_{i+1}$): En este caso la cola del tren podrá estar situada en el sector inicial del tramo actual o en uno de los sectores finales del tramo anterior (3 opciones).

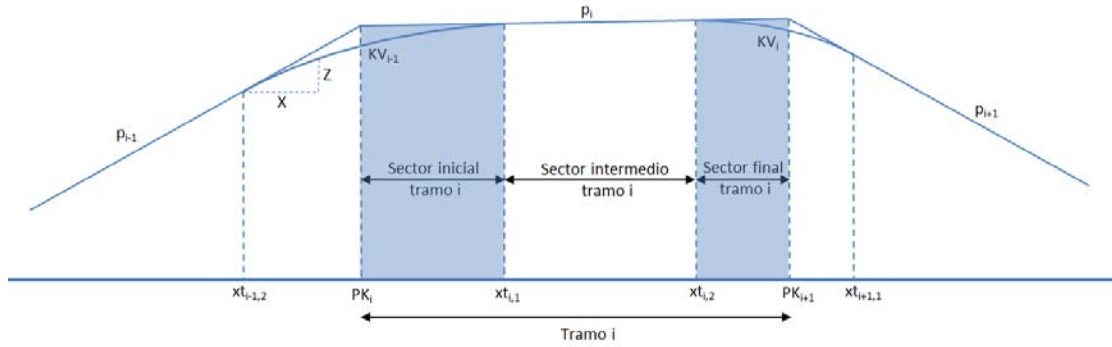


Figura 2-21. Modelo del trazado en alzado mediante transiciones o acuerdos verticales entre pendientes definidos por el parámetro KV.

- Límites de velocidad máxima

Por otro lado, al considerar la longitud, ante un aumento de límite de velocidad máxima, por motivos de seguridad el tren no podrá rebasar la velocidad máxima anterior hasta que la cola del mismo supere la posición que indica el comienzo de la nueva velocidad máxima. De la misma manera, ante una reducción del límite de velocidad máxima, el tren deberá frenar con la suficiente antelación para garantizar que la cabeza del tren no supere la nueva velocidad máxima una vez alcanzado el punto kilométrico de inicio de la misma (Jong and Chang 2005b).

La Figura 2-22 muestra los perfiles de velocidad de un tren a la salida de la estación de Atocha al considerar la longitud del tren (azul oscuro) y al no considerarla (azul claro), siendo L la longitud del tren. Al simular considerando al tren como una masa puntual, el punto simulado cumpliría con los límites de velocidad, pero no sucedería lo mismo con la cola del tren, con lo que no sería una conducción admisible.

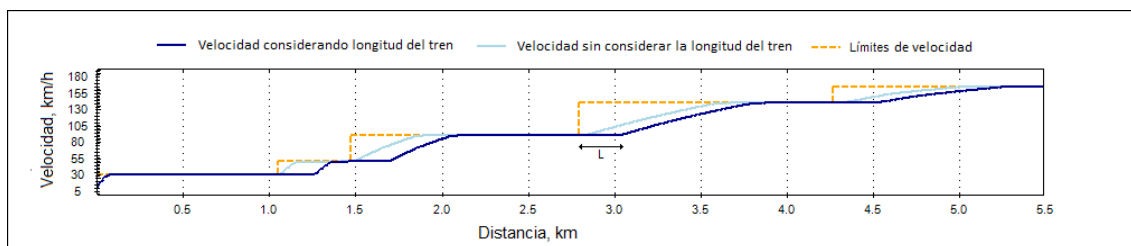


Figura 2-22. Diferencia entre perfiles de velocidad al considerar o no la longitud del tren ante aumentos de límites de velocidad máxima.

- Radio de curvatura

El radio de curvatura instantáneo, que se utilizará para hallar la resistencia debida al mismo en cada instante, se aproximará como la media aritmética entre el radio de curvatura de la cabeza del tren y el radio de curvatura en la cola del mismo mediante la ecuación 2.19.

$$r = \frac{r_{cabeza} + r_{cola}}{2} \tag{2.19}$$

Siendo r el radio de curvatura instantáneo y r_{cabeza} y r_{cola} los radios de curvatura instantáneos de la cabeza y la cola del tren respectivamente.

En esta ocasión se considerará suficiente emplear la media aritmética entre las pendientes de cabeza y cola en lugar de utilizar una expresión similar a la de la pendiente instantánea ya que la influencia de la resistencia debida al radio de curvatura en conducciones en *Alta Velocidad* es considerablemente menor que la de la resistencia debida a la pendiente.

Masa m

La masa del tren se refiere a la suma de las masas correspondientes al tren en vacío y al conjunto de los pasajeros y todas aquellas cargas transportadas, de manera que dicho valor deberá ser ajustado en cada simulación. Se calcula aplicando la ecuación 2.20.

$$m = m_0 + m_c \quad 2.20$$

Siendo m_0 la masa en vacío del tren, y m_c la masa de la carga del mismo.

Coefficiente de inercias rotativas c_r

El coeficiente de inercias rotativas se utiliza para modelar la resistencia cinética de los elementos de rotación del tren mediante una masa equivalente, denominada masa inercial.

Masa inercial m_i

La masa inercial incorpora tanto la masa total del tren como la masa equivalente de sus elementos rotativos. Se calculará mediante la ecuación 2.21.

$$m_i = (1 + c_r) \cdot m_0 + m_c \quad 2.21$$

Siendo m_i la masa inercial del tren, c_r el coeficiente de inercias rotativas y m_0 la masa en vacío del tren y m_c la masa de la carga del mismo.

Motor

A continuación se describen los parámetros del motor incluidos en el modelo del tren: la curva de esfuerzo de tracción máximo, la curva de esfuerzo de freno eléctrico máximo, el esfuerzo de freno neumático, la potencia nominal de tracción, la potencia nominal de freno eléctrico regenerativo y la potencia nominal de los equipos auxiliares.

Curva de esfuerzo de tracción máximo $F_{t,max}$

En los trenes eléctricos o EMU's (Electrical Motor Units) el esfuerzo de tracción máximo que puede suministrar el motor depende de la velocidad, distinguiéndose dos

zonas claramente diferenciadas (Avallone et al. 2006), (Rahman, Ehsani, and Butler 2000):

- Zona de esfuerzo de tracción constante. Este tramo abarca desde una velocidad nula hasta una velocidad determinada (v_{F_t}), que dependerá de las características del motor.
- Zona de potencia constante, donde el esfuerzo de tracción máximo es variable con la velocidad, disminuyendo al aumentar ésta según la ecuación 2.22.

$$F_{t,max@v} = \frac{P_{n,t}}{v} \quad 2.22$$

Siendo $F_{t,max@v}$ el esfuerzo de tracción máximo a la velocidad v , $P_{n,t}$ la potencia nominal de tracción del motor y v la velocidad instantánea del tren.

La Figura 2-23 muestra la curva de esfuerzo de tracción máximo del tren Talgo-Bombardier S-102.

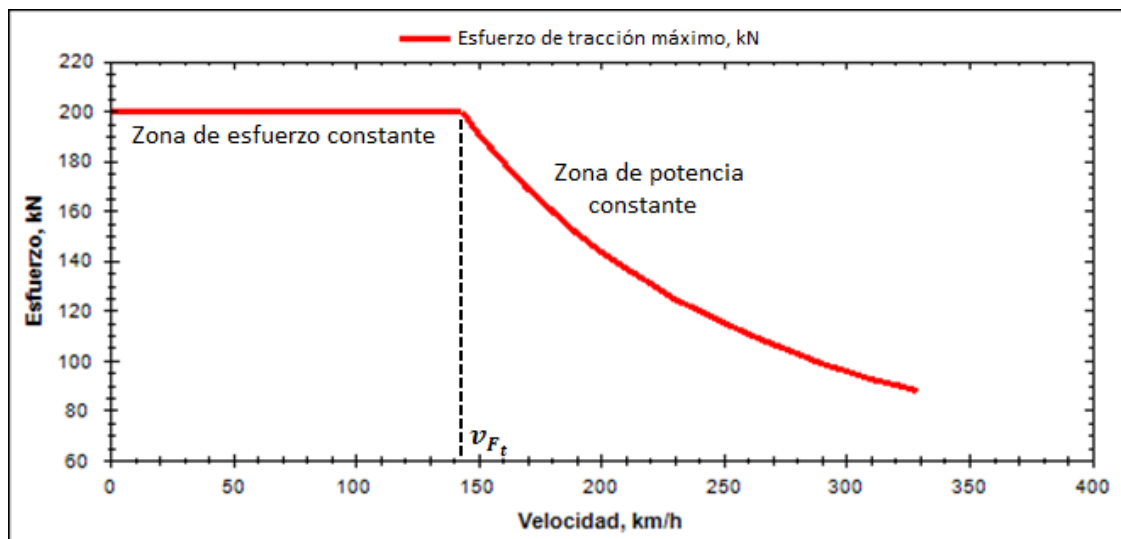


Figura 2-23. Curva de esfuerzo de tracción máximo del tren Talgo-Bombardier S-102. Fuente: Talgo.

Curva de esfuerzo de freno eléctrico máximo $F_{e,max}$

Los trenes de *Alta Velocidad* españoles están equipados con freno eléctrico regenerativo (Ogasa 2008), de manera que el motor funciona como un generador durante los procesos de frenado, inyectando la energía regenerada en la red o guardándola en dispositivos de almacenamiento de energía, que pueden estar embarcados en el propio tren (Steiner, Klohr, and Pagiela 2007), (Domínguez et al. 2012) o fijos en vía (Barrero, Tackoen, and Mierlo 2010). Algunos países como Japón cuentan con sistemas de acumulación de energía fijos en vía con diferentes tecnologías, como volantes de inercia o supercondensadores. En España, en cambio, no se utilizan almacenadores de energía en *Alta Velocidad*, la energía se regenera en corriente alterna y es consumida por los trenes o instalaciones adyacentes a las líneas, o directamente inyectada a la red de distribución, con lo que no se han considerado

acumuladores de energía en el simulador y únicamente se modelará la curva de esfuerzo eléctrico máximo de freno, que será similar a la curva de esfuerzo máximo de tracción, formada por los siguientes tramos:

- Zona de esfuerzo de freno eléctrico constante. Este tramo abarca desde una velocidad reducida ($v_{F_{e1}}$) por debajo de la cual no es posible aplicar frenado regenerativo, hasta una velocidad ($v_{F_{e2}}$), donde ambas dependerán de las características del tren.
- Zona de potencia de freno eléctrico constante, donde el esfuerzo de freno eléctrico máximo es variable con la velocidad, disminuyendo al aumentar ésta según la ecuación 2.23.

$$F_{e,max@v} = \frac{P_{n,f}}{v} \quad 2.23$$

Siendo $F_{e,max@v}$ el esfuerzo de freno eléctrico máximo a la velocidad v , $P_{n,f}$ la potencia nominal de freno eléctrico del motor y v la velocidad instantánea del tren.

La Figura 2-24 muestra la curva de esfuerzo de tracción máximo del tren Talgo-Bombardier S-102.

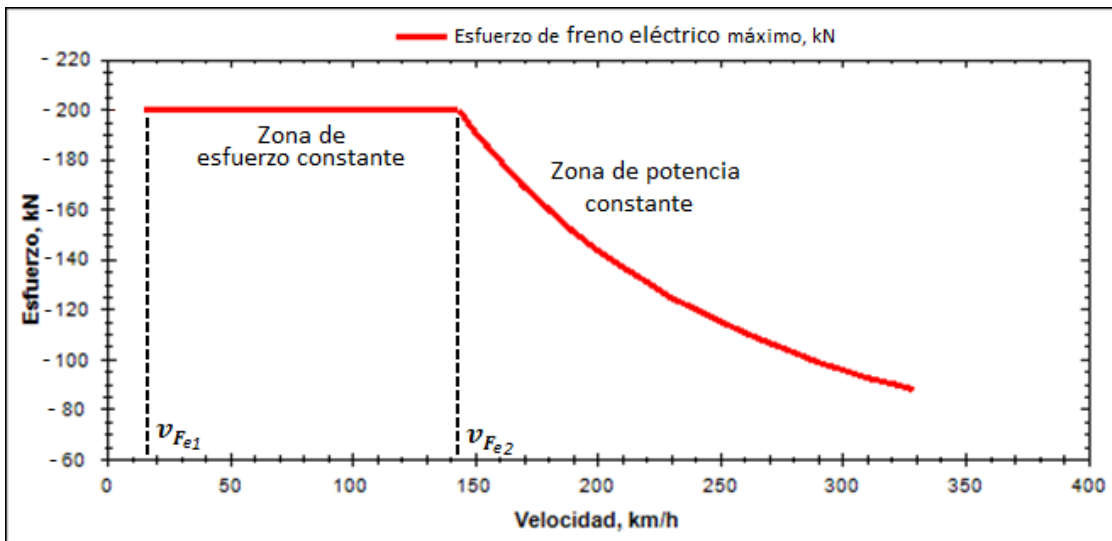


Figura 2-24. Curva de esfuerzo de freno eléctrico máximo del Talgo-Bombardier S-102. Fuente: Talgo.

Esfuerzo de freno neumático máximo $F_{n,max}$

El freno neumático se utilizará como apoyo al freno eléctrico en las ocasiones en que éste no sea suficiente para frenar a la deceleración deseada o para mantener la velocidad requerida. Al frenado combinado eléctrico y neumático se le denomina blending. También se utilizará el freno neumático a velocidades bajas, donde el freno eléctrico no estará disponible.

Potencia nominal de los equipos auxiliares P_{aux}

El consumo eléctrico asociado a los equipos auxiliares del tren (equipos de calefacción y aire acondicionado, iluminación, refrigeración, bombas, etc.) será modelado mediante un valor de potencia constante.

Fuerzas resistentes

Las fuerzas resistentes son todas aquellas fuerzas externas que se oponen al movimiento del tren. El modelo de simulación incluirá la fuerza de resistencia al avance (F_a), la fuerza de resistencia debida a la pendiente (F_p) y la fuerza de resistencia debida al radio de curvatura (F_c).

Resistencia al avance F_a

La resistencia al avance agrupa una serie de resistencias que se oponen al movimiento del tren, como son las resistencias mecánicas (rodadura y rozamientos internos), las resistencias debidas a la entrada de aire (para refrigeración de los motores y la renovación del aire de los pasajeros) y la resistencia aerodinámica (Lukaszewicz 2007). La resistencia al avance será modelada mediante una ecuación de segundo orden dependiente de la velocidad instantánea y definida por la expresión de Davis (S. W. Kim et al. 2006) mostrada en la ecuación 2.24.

$$F_a = A + B \cdot v + C \cdot f_{tun} \cdot v^2 \quad 2.24$$

Siendo F_a la resistencia al avance, A, B y C los coeficientes de la curva de resistencia al avance, f_{tun} el factor de túnel instantáneo, que incrementará el término cuadrático cuando el tren esté atravesando un túnel, y cuyo valor será 1 cuando el tren no esté atravesando un túnel, y v la velocidad instantánea del tren. La Figura 2-25 muestra la forma general de la curva de resistencia al avance en función de la velocidad del tren.

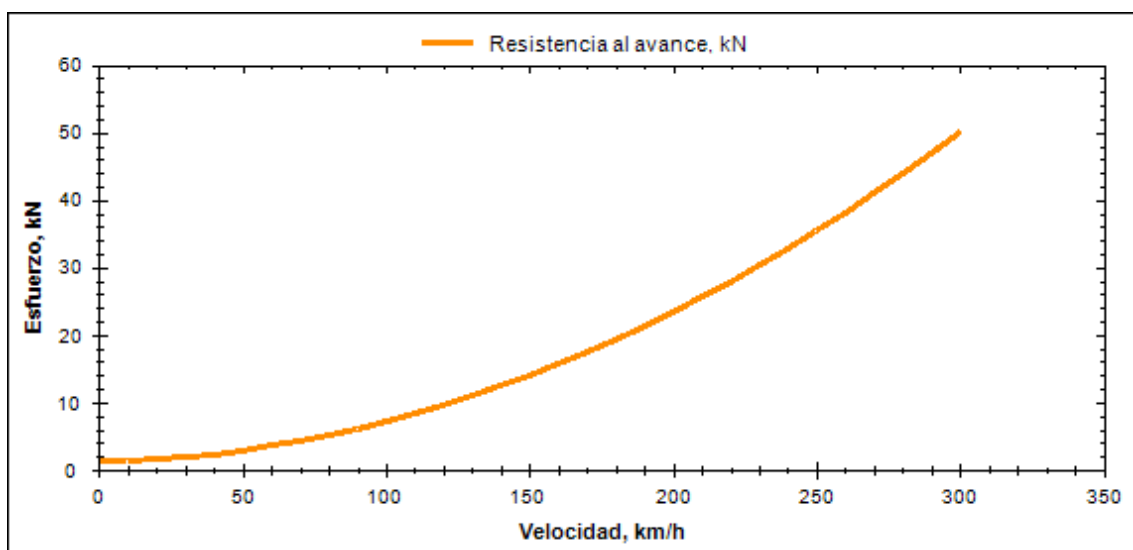


Figura 2-25. Curva de resistencia al avance en función de la velocidad.

Resistencia debida a la pendiente F_p

La resistencia debida a la pendiente es la fuerza resultante de la descomposición del peso del tren en el eje longitudinal al movimiento, según indica la Figura 2-26. Dicha fuerza se opondrá al movimiento en situaciones de rampa (pendiente positiva), o actuará a favor del mismo en caso contrario (pendiente negativa).

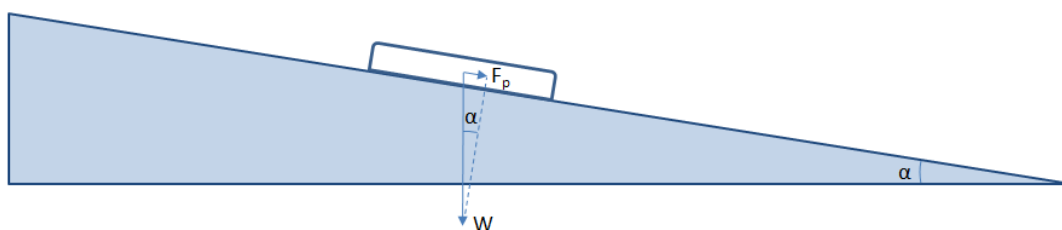


Figura 2-26. Resistencia debida a la pendiente.

El valor de la resistencia debida a la pendiente instantánea se calculará mediante la ecuación 2.25.

$$F_p = W \cdot \text{sen}(\alpha) = m \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad 2.25$$

Siendo F_p la resistencia debida a la pendiente, W el peso del tren, α el ángulo formado por la vía con la horizontal, m la masa del tren y g la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre.

Los perfiles de las líneas de *Alta Velocidad* españolas tienen acotados los valores máximos de pendiente/rampa en un rango de $\pm 30\%$ (30 m de desnivel en un tramo horizontal de 1000 m), siendo sus ángulos máximos los indicados en la ecuación 2.26.

$$\alpha = \pm \arctg\left(\frac{30}{1000}\right) = \pm 0,029991 \text{ rad} \approx \pm \frac{30}{1000} = p \quad 2.26$$

Siendo α el ángulo formado por la vía con la horizontal y p el valor de la pendiente en milésimas.

Al tratarse de ángulos cercanos a cero, se puede aproximar $\text{sen}(\alpha) \approx p$, quedando la expresión de resistencia debida a la pendiente como muestra la ecuación 2.27. De esta manera, el error cometido en el caso más desfavorable ($p = 30\%$) es del 0,0433%, valor despreciable.

$$F_p = m \cdot g \cdot p \quad 2.27$$

Siendo F_p la resistencia debida a la pendiente instantánea, m la masa del tren, g la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre y p el valor de la pendiente instantánea en milésimas.

Resistencia debida al radio de curvatura F_c

La resistencia debida al radio de curvatura es originada por la fricción entre las pestañas y los raíles y por el patinaje entre las ruedas. En *Alta Velocidad* los radios de curvatura son del orden de 10^3 m (Adif 2005), por lo que la resistencia debida al radio de curvatura es considerablemente menor a la resistencia al avance y la resistencia debida a la pendiente. La resistencia debida al radio de curvatura se suele modelar mediante formulas empíricas. En el simulador se utilizará la ecuación 2.28 (Esveld 2001).

$$F_r = m \cdot g \cdot \frac{K_r}{R} \quad 2.28$$

Siendo F_r la resistencia debida al radio de curvatura, m la masa del tren, g la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre, R el radio de curvatura instantáneo y K_r una constante que depende de la distancia entre raíles. Para el caso de las líneas de *Alta Velocidad* españolas, donde dicha distancia corresponde al ancho UIC (Union Internationale des Chemins de fer), de 1435 mm, se utilizará un valor de $K_r = 800$.

Consumo eléctrico

Para modelar el consumo eléctrico del tren en pantógrafo es necesario conocer los rendimientos globales del equipo de tracción y de freno eléctrico regenerativo.

Rendimiento de tracción η_t

El rendimiento global del motor es necesario para calcular el consumo eléctrico del motor del tren. Se utilizará un modelo basado en los trabajos de (Hee-Soo 1998), (Franke, Terwiesch, and Meyer 2000), (Jong and Chang 2005a) y (Van Dongen and Schuit 1989), donde el rendimiento de tracción aumenta con la velocidad y el porcentaje de tracción del tren, según indica la expresión 2.29.

$$\eta_t = f(v, x_t) \quad 2.29$$

Siendo η_t el rendimiento de tracción instantáneo, v la velocidad instantánea del tren y x_t el porcentaje de tracción instantáneo.

En la práctica, para cada tren se deberá ajustar su función de rendimiento dependiente de la velocidad y el porcentaje de tracción mediante registros reales, lo que se detallará en la sección de ajuste del simulador (2.2.3).

Son numerosos los trabajos en los que el rendimiento del motor, tanto de tracción como de freno eléctrico, es considerado constante (C. S. Chang and Sim 1997), (Rongfang and Golovitcher 2003), (Hui-Jen et al. 2008), (Hui-Jen et al. 2008), (Kuriyama, Yamamoto, and Miyatake 2010), lo que supone una simplificación que influirá negativamente en el cálculo del consumo energético.

Rendimiento de freno eléctrico η_e

Al igual que el rendimiento de tracción, el rendimiento del freno eléctrico se modelará como una función dependiente de la velocidad y el porcentaje de freno instantáneos según la expresión 2.30.

$$\eta_e = f(v, x_f) \quad 2.30$$

Siendo η_e el rendimiento de freno eléctrico instantáneo, v la velocidad instantánea del tren y x_e el porcentaje de freno eléctrico instantáneo.

Al igual que en el caso del rendimiento de tracción, el rendimiento de freno eléctrico deberá ser ajustado para cada tren mediante registros reales, lo que se detallará en la sección de ajuste del simulador (2.2.3).

2.2.1.3. MODELO DE LA CONDUCCIÓN MANUAL

El objetivo del simulador es calcular de manera precisa el tiempo de recorrido y consumo energético de conducciones manuales en *Alta Velocidad*, y por lo tanto el modelo empleado para definirla es de capital importancia. Este modelo deberá ser lo suficientemente general como para permitir cualquier combinación de estrategias de conducción eficiente de manera que puedan ser evaluadas en el algoritmo de optimización que se detallará en la sección 2.3. Al mismo tiempo, el modelo de la conducción manual deberá ser lo suficientemente claro y sencillo como para no suponer dificultades de interpretación o aplicación a los maquinistas durante los servicios comerciales.

Como se indicó en la introducción, las estrategias de conducción eficiente representan consignas de alto nivel que definirán las acciones a realizar durante las mismas, lo que se traducirá en la práctica en un esfuerzo a aplicar variable, y que podrá presentar los siguientes valores:

- Tracción: Esfuerzo motor positivo, que variará de forma continua desde cero hasta el máximo esfuerzo de tracción ($F_{t,max@v}$) a la velocidad instantánea del tren.
- Deriva: Esfuerzo motor nulo.
- Freno: Esfuerzo motor negativo, que variará de forma continua desde cero hasta el máximo esfuerzo de freno ($F_{e,max@v}$) a la velocidad instantánea del tren.

El esfuerzo puede variar de forma continua en el intervalo [$F_{e,max@v}$, $F_{t,max@v}$] (Figura 2-27). No obstante, en la práctica no será viable definir una conducción manual mediante esta variable de control, ya que esto supondría un listado interminable de acciones, que tendrían una dificultad máxima para ser implementadas por el maquinista.

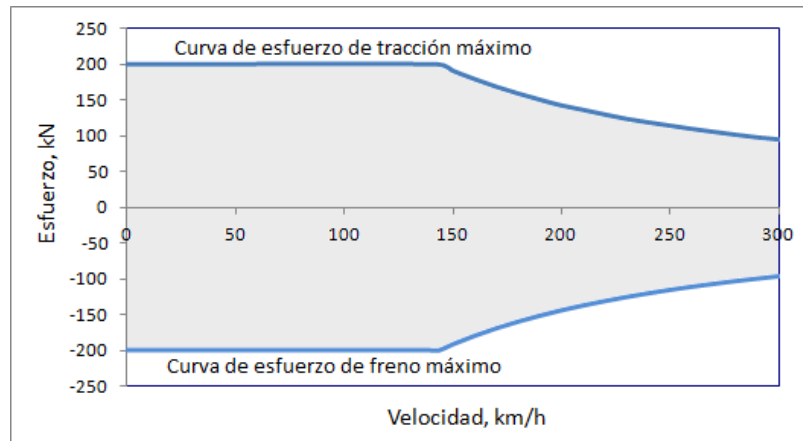


Figura 2-27. Zona de trabajo del esfuerzo motor.

Por este motivo, el modelo de conducción manual utilizará las estrategias de conducción eficiente para agrupar conjuntos de acciones sobre el esfuerzo. Se denomina consigna eficiente a la aplicación de una estrategia de conducción eficiente a lo largo de un tramo del trayecto. El modelo de conducción manual que se empleará en la tesis consistirá en un conjunto de consignas eficientes que se sucederán secuencialmente a lo largo de la totalidad del trayecto, de manera que cada punto del mismo estará afectado por una consigna de conducción eficiente. En concreto, el modelo de conducción propuesto utilizará consignas de regulación sin freno hasta la aplicación de una deriva final a la llegada a estación.

De este modo, durante una conducción manual el maquinista podrá encontrarse bajo la influencia de una consigna de regulación de velocidad sin freno o bajo la influencia del tramo de deriva final, debiendo actuar de diferente forma según corresponda:

Punto bajo la influencia de una consigna de regulación de velocidad sin freno

Cuando un maquinista se encuentra bajo la influencia de una consigna de regulación de velocidad sin freno deberá manipular el mando de tracción con el fin de cumplir dicha estrategia de conducción eficiente. Según sea el valor de la velocidad instantánea del tren, se podrán dar las siguientes situaciones:

- Velocidad instantánea inferior a la velocidad de regulación sin freno

Esta situación se dará en las inmediaciones de las salidas de estación, donde los límites de velocidad máxima serán en general inferiores al valor de velocidad de regulación vigente (Figura 2-28), y en tramos donde la rampa es tan pronunciada que imposibilita que el tren mantenga la velocidad de regulación deseada (Figura 2-29), aún aplicando el esfuerzo de tracción máximo. En ambos casos, el maquinista tratará de alcanzar lo antes posible dicha velocidad de regulación aplicando un porcentaje de esfuerzo de tracción máximo hasta conseguirlo, siempre respetando los límites de velocidad máxima de la línea.

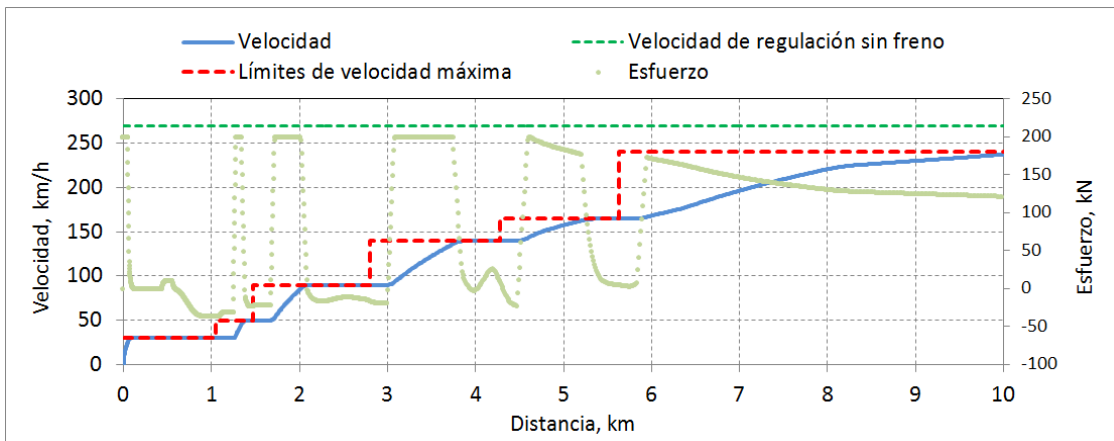


Figura 2-28. Conducción manual a la salida de estación.

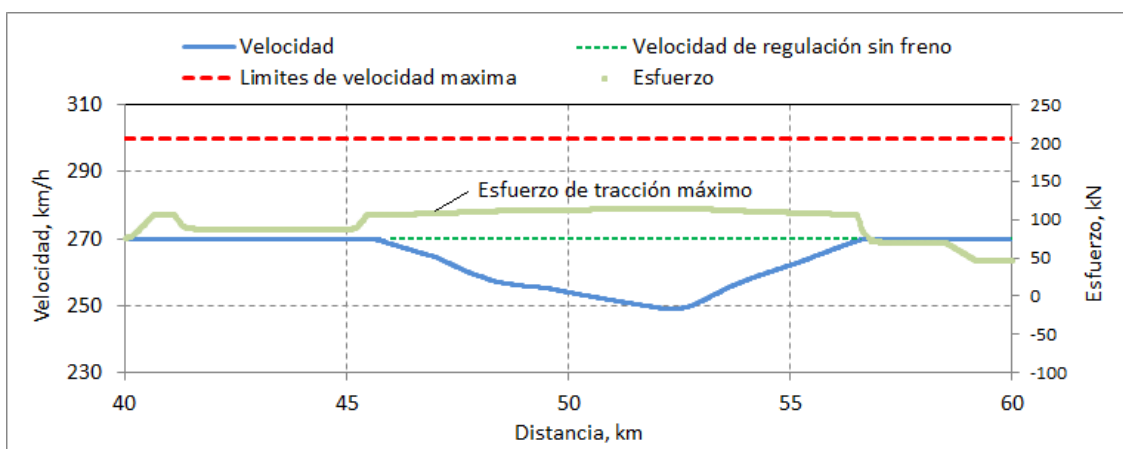


Figura 2-29. Tramo de pendiente pronunciada donde no es posible alcanzar la velocidad de regulación.

Una vez se alcance la velocidad de regulación deseada, el maquinista comenzará la regulación de velocidad sin freno propiamente dicha.

- Velocidad del tren igual o superior a la velocidad de regulación sin freno vigente.

En esta situación el maquinista estará en pleno proceso de regulación de velocidad sin freno, y por lo tanto aplicando el esfuerzo de tracción necesario en cada momento para mantener la velocidad consigna (Figura 2-30). Por tanto, el esfuerzo de tracción estará comprendido en el intervalo $[0, F_{t,max@v}]$.

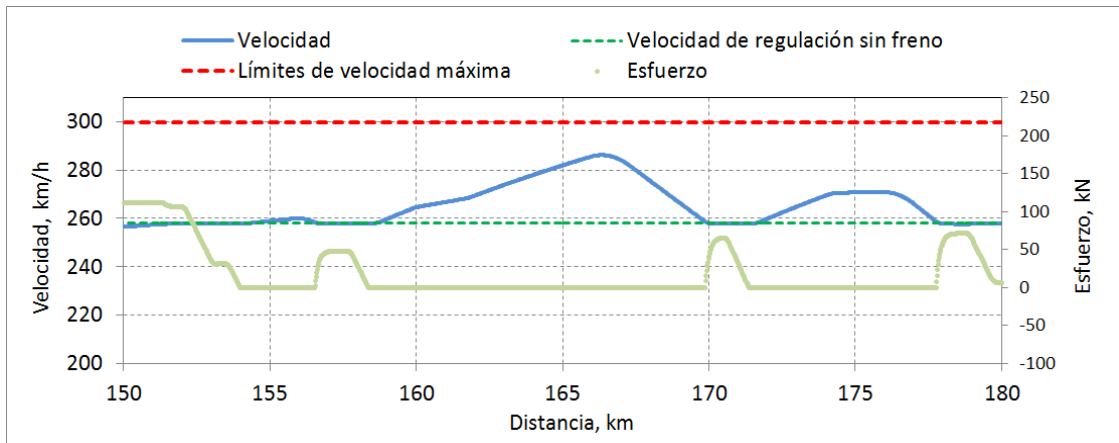


Figura 2-30. Estrategia de regulación de velocidad sin freno.

Por otro lado, las transiciones entre consignas de regulación de velocidad sin freno representan casos particulares de las dos anteriores situaciones; al pasar de un tramo de regulación de velocidad sin freno a otro, podrán darse dos situaciones:

1. La velocidad instantánea del tren en el momento de la transición es menor que la velocidad de la nueva consigna de regulación sin freno: esta situación es análoga a la mostrada en la Figura 2-28, (Figura 2-31).
2. La velocidad del tren en el momento de la transición es mayor que la nueva velocidad de regulación sin freno: esta situación es análoga a la situación descrita en la Figura 2-30, (Figura 2-32), de manera que el tren aplicará una deriva hasta alcanzar la nueva velocidad de regulación.

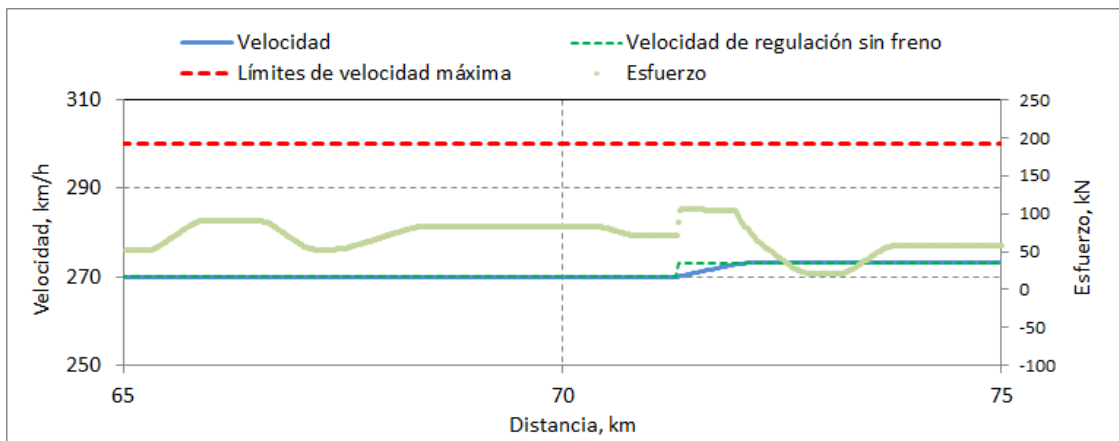


Figura 2-31. Transición de tramos de regulación de velocidad sin freno con aumento de velocidad de regulación.

Al definir la transición entre consignas de regulación de velocidad de esta manera, un tramo de deriva intermedio podrá ser definido como un tramo de regulación de velocidad sin freno a 0 km/h. De esta manera, se considerará que la secuencia de consignas que definirá una conducción manual a lo largo de un trayecto será un conjunto de tramos de regulación de velocidad sin freno o de regulación de velocidad pura seguido de un tramo de deriva final. Por lo tanto, el número mínimo de consignas de una conducción manual será dos.

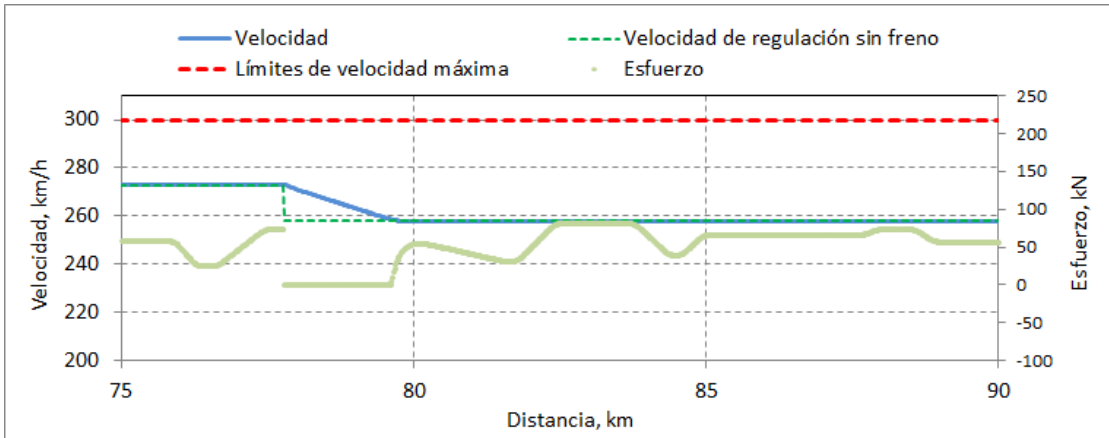


Figura 2-32. Transición de tramos de regulación de velocidad sin freno con disminución de velocidad de regulación.

Punto bajo la influencia del tramo de deriva final

Cuando el maquinista alcance el comienzo de la consigna de deriva final deberá situar el manipulador de tracción en cero, lo que únicamente será interrumpido por las curvas de freno previas a las reducciones de velocidad máxima o a la parada en estación (Figura 2-33).

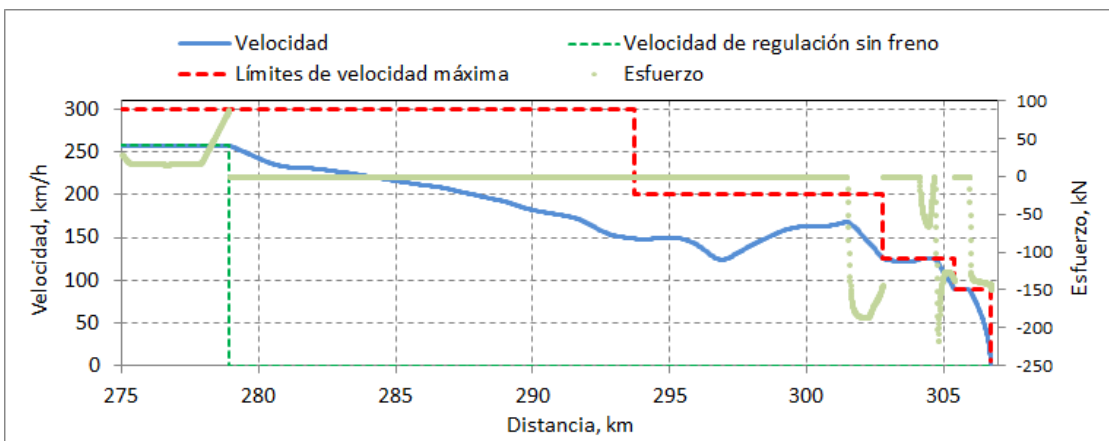


Figura 2-33. Estrategia de deriva final.

De esta manera queda completamente definida la estructura de una conducción manual y la casuística que se podrá dar durante la implementación de la misma. Los valores de los diferentes parámetros que caracterizarán cada consigna (inicio, fin y velocidad de consigna) serán las incógnitas a resolver en el modelo de optimización de la conducción manual que se aborda en la sección 2.3.

Al estar definidas las transiciones entre tramos de regulación de velocidad sin freno como se ha descrito anteriormente, las demás estrategias de conducción (deriva-remotor, regulación de velocidad y deriva no final) tienen cabida en el modelo de conducción manual propuesto eligiendo adecuadamente los parámetros de las consignas de regulación sin freno.

El número de consignas empleado para la definición de cada conducción deberá posibilitar la fácil implantación por parte del maquinista, de forma que el número máximo dependerá de la longitud de cada trayecto. El modelo de la conducción manual responderá por tanto a un conjunto de N consignas, cada una de ellas gobernada con una estrategia de conducción manual, definida por los siguientes campos:

- Punto kilométrico inicial $X_{ci,i} (m)$: Indica el punto donde comenzará la consigna i .
- Punto kilométrico final $X_{cf,i} (m)$: Indica el punto donde finalizará la consigna i .
- Velocidad de consigna $V_{c,i} (km/h)$: Indica la velocidad de regulación de la consigna i . En el caso de una consigna de deriva, dicho valor será nulo.

La Figura 2-34 muestra gráficamente el modelo de la conducción manual empleado.

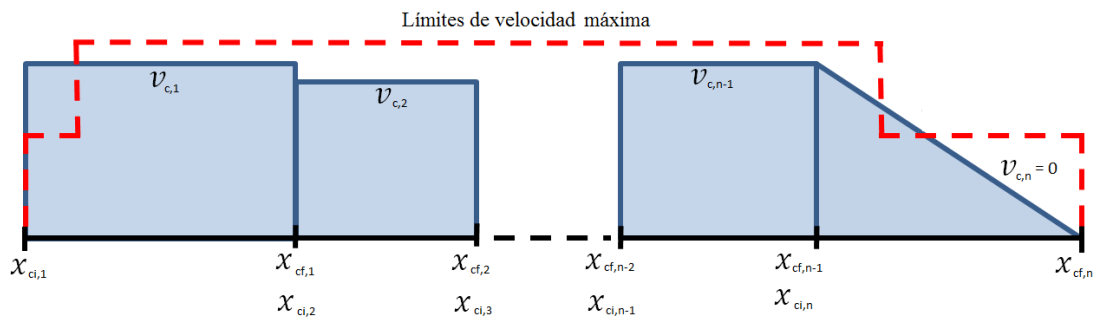


Figura 2-34. Modelo de conducción manual.

A la hora de simular una conducción, se seguirán las consignas de conducción manual siempre que no entren en conflicto con las restricciones operativas del servicio.

2.2.2. FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR

El simulador desarrollado se basa en un modelo de eventos discretos determinista (Law and Kelton 2000), es decir, durante una ejecución, el sistema simulado evoluciona a lo largo del tiempo en una representación donde las variables de estado cambian instantáneamente en diferentes momentos en que ocurren los eventos del sistema. Por otro lado, el que sea determinista implica que no contiene ninguna componente probabilística y una vez introducidos los datos de entrada, la salida del simulador será siempre la misma.

Por motivos de eficiencia computacional, el reloj de simulación, variable que indicará el valor instantáneo del tiempo simulado, avanzará de dos maneras diferentes; por paso de tiempo discreto constante y por salto de distancia al próximo evento (Goodman, Siu, and Ho 1998).

El avance del reloj de simulación por paso de tiempo discreto constante consiste en incrementar el reloj de simulación un intervalo o paso regular de tiempo en cada paso de simulación, de forma que cada intervalo o paso estará caracterizado por un estado inicial y un estado final. Para conocer las variables de un estado será necesario

conocer las variables en el estado anterior y las leyes que rigen el cambio entre ambos (Figura 2-35). Dichas leyes serán las del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, ya que se considerará que la aceleración del tren se mantendrá constante a lo largo de cada paso de simulación. Este tipo de avance del reloj de simulación será empleado cuando el tren se desplace con aceleración distinta de cero.

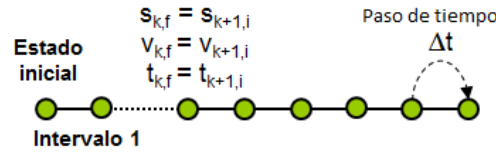


Figura 2-35. Avance del tiempo de reloj por paso de tiempo discreto.

Al considerar constante la aceleración durante un paso de simulación se estará acumulando un error de aproximación, que será menor cuanto menor sea el paso de simulación empleado, pero a costa de aumentar el tiempo de ejecución de la simulación. El tiempo de computación no supondrá un factor crítico en diseños de conducciones eficientes offline, pudiendo establecerse un valor de paso de tiempo tan pequeño como se desee. Sin embargo, sí podrá suponerlo en aplicaciones en tiempo real, donde se deberá elegir un valor de compromiso entre el tiempo de cálculo y el error cometido. La influencia del paso de simulación se discutirá en la sección 2.2.4.

Al considerar la transición entre estados como un movimiento de aceleración constante, la posición, velocidad y tiempo de un estado serán calculados mediante la posición, velocidad y tiempo del estado anterior y las ecuaciones del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, según indican las ecuaciones 2.31, 2.32 y 2.33.

$$t_{k+1} = t_k + \Delta t \quad 2.31$$

$$v_{k+1} = v_k + a_k \cdot \Delta t \quad 2.32$$

$$s_{k+1} = s_k + \frac{v_{k+1}^2 - v_k^2}{2 \cdot a_k} \quad 2.33$$

Siendo t_k , v_k y s_k el tiempo, la velocidad y el espacio recorrido en el estado k , t_{k+1} , v_{k+1} y s_{k+1} el tiempo, la velocidad y el espacio recorrido en el estado $k + 1$, Δt el paso de tiempo y a_k la aceleración en el estado k , que se considerará constante durante la transición entre el estado k y el estado $k + 1$.

La aceleración se obtendrá aplicando la primera ley de Newton, indicada en la ecuación 2.34.

$$\sum F_k = m_i \cdot a_k \quad 2.34$$

Siendo $\sum F_k$ el sumatorio de las fuerzas que intervienen en el movimiento del tren en el estado k , m_i la masa inercial del mismo, y a_k su aceleración instantánea en el estado k .

Por otro lado, el avance del reloj por salto al siguiente evento consiste en realizar saltos del reloj de simulación definidos por una secuencia de eventos que son susceptibles de cambiar las variables de estado del sistema. Al activarse un evento se puede dar lugar a la activación de nuevos eventos que se añadirán a la cola de eventos del simulador (Cury, Gomide, and Mendes 1980), (Van Breusegem, Campion, and Bastin 1991). Este tipo de avance del reloj de simulación es utilizado cuando el tren se desplaza a velocidad constante (Figura 2-36).

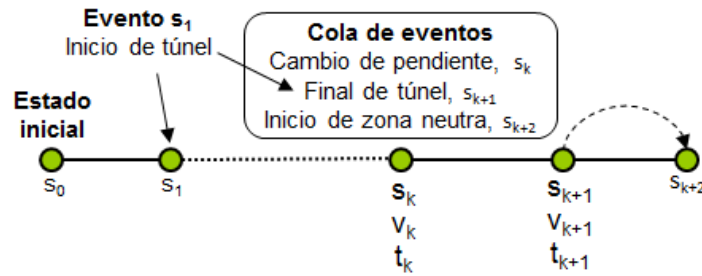


Figura 2-36. Avance del tiempo de reloj por eventos.

Los eventos empleados en el modelo de simulación estarán caracterizados por dos atributos. El primero indicará la naturaleza del evento, como el comienzo de un túnel, un cambio de pendiente, un cambio de consigna de conducción, etc. El segundo indicará la posición en que dicho evento se produce, atributo según el cual se ordenarán crecientemente los eventos en la cola de eventos, de manera que el disparo de los eventos obedecerá a dicho orden. Dado que entre la consecución de un evento y el siguiente se mantendrá constante la velocidad del tren y la posición de los eventos es conocida, el tiempo en un estado se calculará a partir del tiempo en el estado anterior y de la ley del movimiento rectilíneo uniforme (ecuación 2.35).

$$t_{k+1} = t_k + \frac{s_{k+1} - s_k}{v_k} \quad 2.35$$

Siendo t el tiempo, s la posición y v la velocidad instantánea, y donde el subíndice k hace referencia al evento k .

En este modo de avance del reloj de simulación, las variables de cálculo internas del simulador se recalculan únicamente con la activación de un nuevo evento, lo que puede llegar a suponer un ahorro de operaciones considerable respecto al avance de tiempo de reloj por paso de tiempo constante, según el valor de paso elegido.

En cada avance por evento se calcula la energía consumida por el tren a partir del esfuerzo aplicado por el motor y el modelo de rendimiento, donde el esfuerzo se obtiene despejándolo de la ecuación 2.4 para un valor de aceleración nulo.

El modelo de simulación combinará ambos métodos de avance del reloj de simulación, empleando el avance del reloj mediante paso de tiempo discreto constante cuando la aceleración del tren sea distinta de cero, y el avance del reloj por salto al siguiente evento cuando el tren se desplace a velocidad constante.

El modelo de simulación se ha desarrollado empleando el lenguaje de programación C++, un lenguaje de Programación Orientada a Objetos (POO) precompilado, lo que permite velocidades de cálculo mayores que las de los lenguajes interpretados como Visual Basic.

La simulación de una conducción comenzará en el punto de control inicial del trayecto a simular y terminará en el punto de control final. A lo largo de la misma se irán actualizando sucesivamente las variables de estado hasta alcanzar la condición de parada cuando el tren alcance su destino. El diagrama de la Figura 2-37 representa el proceso completo de una simulación de una conducción manual.

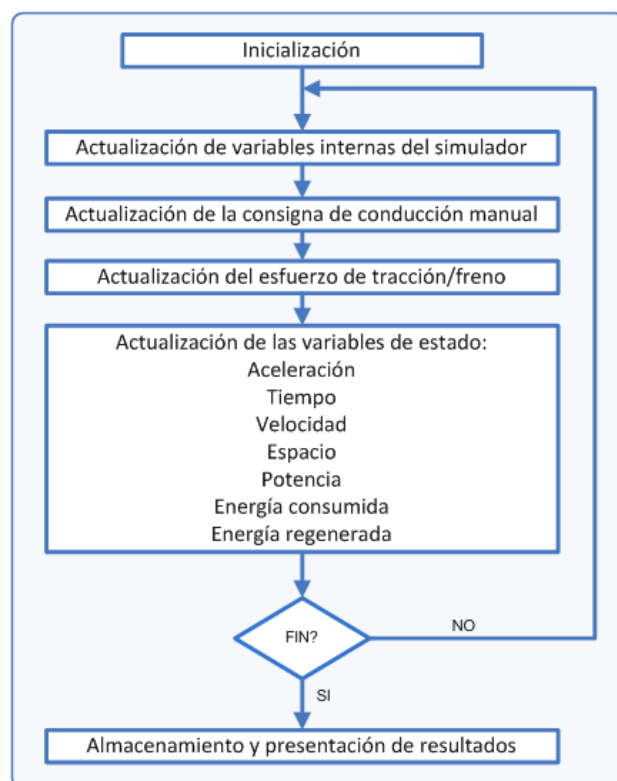


Figura 2-37. Diagrama de proceso de una simulación.

Iniciación

Toda simulación de una conducción comenzará con la inicialización de todas las variables empleadas en la misma. Esta etapa tiene lugar únicamente al inicio de cada simulación, y su objetivo es asignar los valores iniciales a todas las variables empleadas en la simulación.

Actualización de variables internas del simulador

En esta etapa se actualiza el valor de todas las variables internas que tienen influencia en el posterior cálculo de las variables de estado y que han podido modificar su valor respecto al paso anterior. Las principales variables a actualizar son las siguientes:

- Pendiente p : Se actualiza con la ecuación 2.18 teniendo en cuenta los diferentes sectores de pendiente en que se encuentre el tren.

- Radio de curvatura r : Se actualiza con la ecuación 2.19 entrando en la tabla del trazado en planta con la posición de la cabeza y la cola del tren y obteniendo los radios de curvatura en ambos puntos.
- Resistencia al avance F_a : Se actualiza aplicando la ecuación 2.24 para la velocidad y el factor de túnel correspondientes. El factor de túnel será 1 cuando el tren no esté atravesando un túnel.
- Resistencia debida a la pendiente F_p : Se actualiza introduciendo el valor de pendiente hallado anteriormente en la ecuación 2.27.
- Resistencia al radio de curvatura F_r : Se actualiza introduciendo el valor del radio de curvatura hallado anteriormente en la ecuación 2.28.
- Fuerzas externas F_{ext} : Las fuerzas externas se calcularán aplicando la ecuación 2.36 con los valores de las tres resistencias halladas anteriormente.

$$F_{ext} = F_a + F_p + F_r \quad 2.36$$

Además de estas variables que tienen influencia directa en el cálculo de las variables de estado, también se actualizan en esta etapa otras variables auxiliares cuyo objetivo es controlar el cumplimiento de las restricciones operativas del servicio:

- Curva de freno por reducción de velocidad (límites de velocidad de la línea): Se calcula la velocidad a la que habría que comenzar a frenar con una deceleración de servicio determinada para alcanzar la siguiente reducción de velocidad en la posición correspondiente, de forma que si la velocidad del tren es mayor o igual que dicha velocidad, debe comenzar a frenar.
- Curva de freno por parada en estación: Se calcula la velocidad a la que habría que comenzar a frenar con una deceleración de servicio determinada para alcanzar la parada en la estación de destino, de forma que si la velocidad del tren es mayor o igual que dicha velocidad, debe comenzar a frenar.
- Tramo de zona neutra: Se comprueba si el tren se encuentra en una zona neutra, a lo largo de la cual se aplicará un esfuerzo de freno reducido con el fin de alimentar a los equipos auxiliares durante las mismas.
- Tramo de túnel: Se comprueba si el tren ha entrado o salido de un túnel con el fin de actualizar el factor del túnel que afectará al cálculo de la resistencia al avance.

Actualización de la consigna de conducción manual

En esta función se actualiza la consigna de conducción manual correspondiente, entrando en la tabla de consignas con la posición instantánea y obteniendo la velocidad de consigna correspondiente, que será cero para el caso de la consigna de deriva final.

Actualización del esfuerzo de tracción/freno

En este momento se calculará el valor de esfuerzo de tracción/freno instantáneo a aplicar, valor que se transmitirá al bloque de actualización de las variables de estado. La Figura 2-38 muestra un fragmento del perfil de velocidad de una conducción y su esfuerzo de tracción/freno durante el mismo.

Ya que los procesos de frenado se realizarán a deceleración de servicio constante, si durante los mismos el esfuerzo de freno necesario para alcanzar dicha deceleración es menor que el esfuerzo de freno eléctrico máximo a la velocidad instantánea del tren, entonces dicho esfuerzo será íntegramente suministrado por el freno eléctrico regenerativo. En caso contrario se frenará mediante blending, de forma que el freno eléctrico regenerativo aportará el máximo esfuerzo de freno posible, y el freno neumático aportará el resto.

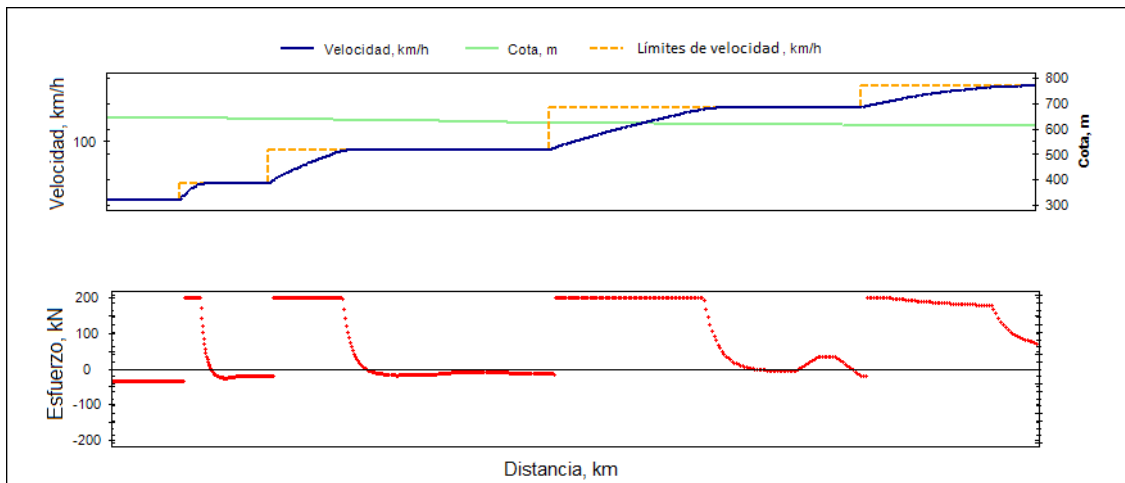


Figura 2-38. Esfuerzo de tracción/freno.

Una vez hallado el esfuerzo de tracción/freno instantáneo se actualiza el valor del sumatorio de fuerzas aplicando la ecuación 2.37.

$$\sum F = F + F_{ext} \quad 2.37$$

Siendo $\sum F$ el sumatorio de fuerzas que actúa sobre el tren, F el esfuerzo de tracción/freno instantáneo y F_{ext} el conjunto de las fuerzas externas, calculadas previamente en la ecuación 2.36.

Por otro lado, se actualizan también los porcentajes de tracción y freno eléctrico regenerativo mediante las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente.

Actualización de las variables de estado

En esta etapa se refrescarán las variables de estado que caracterizan el instante de simulación del tren. En primer lugar se calculan las variables cinemáticas; aceleración, tiempo, velocidad y posición.

Aceleración a : La aceleración instantánea se actualiza despejándola de la ecuación de la segunda ley de Newton (2.34) como muestra la ecuación 2.38.

$$a = \frac{\sum F}{m_i} \quad 2.38$$

Siendo a la aceleración instantánea, m_i la masa inercial del tren y $\sum F$ el sumatorio total de fuerzas, obtenido tras la aplicación de la ecuación 2.37.

Tiempo t : El tiempo se actualiza sumando el paso de tiempo, mediante la ecuación 2.39.

$$t = t + \Delta t \quad 2.39$$

Siendo t el tiempo instantáneo de simulación y Δt el paso de simulación.

Velocidad v : La velocidad se actualiza aplicando la ecuación 2.40.

$$v = v + a \cdot \Delta t \quad 2.40$$

Siendo v la velocidad instantánea, a la aceleración instantánea y Δt el paso de simulación.

Espacio s : El espacio recorrido se calculará a partir de la velocidad en el estado anterior y la aceleración entre ambos, según indica la ecuación 2.41.

$$s = s + \frac{v^2 - v_i^2}{2 \cdot a} \quad 2.41$$

Siendo s el espacio recorrido, v la velocidad instantánea del tren, v_i la velocidad en el estado anterior y a la aceleración instantánea.

Una vez calculadas las variables de estado cinemáticas se pasa a calcular las variables energéticas.

Potencia eléctrica activa en pantógrafo P : Para calcular la potencia eléctrica de tracción consumida o de freno eléctrico regenerada en pantógrafo, previamente será necesario actualizar el valor de los rendimientos de tracción y freno eléctrico regenerativo, según el caso. Para ello, previamente habrá sido necesario ajustar los rendimientos de tracción y freno eléctrico como funciones dependientes de la velocidad y el porcentaje de tracción (expresión 2.29 y 2.30).

En caso de tracción, la potencia eléctrica instantánea consumida en pantógrafo se calculará mediante la suma de la potencia de tracción y la potencia de los equipos auxiliares (ecuación 2.42).

En caso de freno (esfuerzo negativo) se aplicará la ecuación 2.43, donde la energía regenerada, antes de ser inyectada en catenaria, se utilizará para alimentar a los equipos auxiliares.

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta_t} + P_{aux} \quad 2.42$$

$$P = F \cdot v \cdot \eta_e + P_{aux} \quad 2.43$$

Siendo P la potencia eléctrica activa en pantógrafo, F el esfuerzo del motor, v la velocidad, η_t el rendimiento global de tracción del motor, η_e el rendimiento global del freno eléctrico regenerativo y P_{aux} la potencia nominal de los equipos auxiliares.

Energía bruta en pantógrafo $e_{b,p}$: La energía consumida en pantógrafo se incrementará cuando la potencia eléctrica sea positiva, es decir, cuando el motor del tren esté traccionando, y se calculará suponiendo que la potencia durante un paso de simulación se mantiene constante. El error cometido al hacer dicha suposición será menor cuanto menor sea el paso de simulación empleado en el simulador (Goodman, Siu et al. 1998). De esta manera, la energía bruta consumida en pantógrafo hasta el estado actual del tren se calculará mediante la ecuación 2.44.

$$e_{b,p} = e_{b,p} + P \cdot \Delta t \quad 2.44$$

Siendo $e_{b,p}$ la energía bruta consumida en pantógrafo, P la potencia eléctrica activa en pantógrafo y Δt el paso de simulación.

Potencia de pérdidas en catenaria P_{cat} : Para hallar la potencia instantánea de pérdidas en catenaria es necesario calcular previamente la intensidad que circula por la misma y la resistencia equivalente entre el tren y la subestación que lo esté alimentando.

La intensidad se calcula aplicando la ecuación 2.17 para el valor de potencia activa hallado previamente, y considerando la tensión en catenaria y el factor de potencia constantes durante toda la simulación. Por otro lado, la resistencia equivalente se halla mediante la ecuación 2.14, siendo la distancia entre el tren y la subestación de alimentación calculada mediante el valor absoluto de la diferencia entre la posición del tren y la posición de la subestación que esté en ese momento alimentándolo. Finalmente, la potencia instantánea de pérdidas en catenaria se halla mediante la ecuación 2.13.

Energía bruta en subestación $e_{b,s}$: La energía bruta en subestación se incrementará cuando la potencia eléctrica sea positiva, es decir, cuando el motor del tren esté traccionando, y se calculará aplicando la ecuación 2.45.

$$e_{b,s} = e_{b,s} + (P + P_{cat}) \cdot \Delta t \quad 2.45$$

Siendo $e_{b,s}$ la energía bruta consumida en subestación, P la potencia activa en pantógrafo, P_{cat} la potencia de pérdidas en catenaria y Δt el paso de simulación.

Energía regenerada en pantógrafo $e_{r,c}$: La energía regenerada en pantógrafo se incrementará cuando la potencia eléctrica sea negativa, es decir, cuando el motor del tren esté frenando, y se calculará mediante la ecuación 2.46.

$$e_{r,p} = e_{r,p} + P \cdot \Delta t \quad 2.46$$

Siendo $e_{r,p}$ la energía regenerada en pantógrafo, P la potencia activa en pantógrafo y Δt el paso de simulación.

Energía regenerada en subestación $e_{r,s}$: La energía eléctrica regenerada en subestación se incrementará cuando la potencia eléctrica sea negativa, es decir, cuando el motor del tren esté traccionando, será menor que la regenerada en pantógrafo debido a las pérdidas en catenaria, y se calculará mediante la ecuación 2.47.

$$e_{r,s} = e_{r,s} + (P + P_{cat}) \cdot \Delta t \cdot \eta_{areg} \quad 2.47$$

Siendo $e_{r,s}$ la energía regenerada en subestación, P la potencia activa en pantógrafo, P_{cat} la potencia de pérdidas en catenaria, Δt el paso de simulación y η_{areg} el rendimiento de aprovechamiento de la energía regenerada en subestación, que en la tesis se considera de valor 1.

En este punto finaliza la actualización de las variables de estado, momento en que el simulador regresa al paso 2, repitiendo sucesivamente todos los pasos hasta que el tren llega a su destino, concluyendo la simulación. Una vez finalizada, se guardan los resultados que caracterizarán a la conducción simulada.

Almacenamiento y presentación de resultados

En este punto se guardan los resultados globales de la conducción, asignando a las variables globales el valor de las variables de estado en el último estado de la simulación, según las ecuaciones 2.48-2.54.

- Tiempo de recorrido.

$$T_r = t \quad 2.48$$

- Energía bruta consumida en pantógrafo.

$$E_{b,p} = e_{b,p} \quad 2.49$$

- Energía regenerada en pantógrafo.

$$E_{r,p} = e_{r,p} \quad 2.50$$

- Energía neta consumida en pantógrafo.

$$E_{n,p} = E_{b,p} - E_{r,p} \quad 2.51$$

- Energía bruta consumida en subestación.

$$E_{b,s} = e_{b,s} \quad 2.52$$

- Energía regenerada en subestación.

$$E_{r,s} = e_{r,s} \quad 2.53$$

- Energía neta consumida en subestación.

$$E_{n,s} = E_{b,s} - E_{r,s} \quad 2.54$$

2.2.3. AJUSTE Y VALIDACIÓN DEL SIMULADOR

La validación de un modelo de simulación es el proceso que determina si éste representa de manera precisa el sistema estudiado para el cumplimiento de los objetivos perseguidos (Law and Kelton 2000). En este caso, el sistema en estudio es la conducción manual en trayectos de *Alta Velocidad*, y el objetivo, el diseño de conducciones manuales eficientes. En esta sección se validará la precisión en el cálculo del tiempo de recorrido y consumo energético de las conducciones manuales simuladas, elementos con los que se evaluarán dichas conducciones en la fase de diseño de las mismas.

Toda validación de un modelo de simulación requiere un paso previo de ajuste del mismo. En el caso concreto del presente modelo de simulación será necesario ajustar el modelo de tren, de la línea y de algunos parámetros empleados en la simulación. Para ello, es necesario comparar los resultados simulados de conducciones con medidas reales de las mismas conducciones (Law and Kelton 2000).

El IIT participó en el Proyecto ELECRAIL, proyecto de ámbito español y financiación pública en la que participaron las principales empresas del sector ferroviario, incluyendo operadoras, gestoras de infraestructura, fabricantes y centros de investigación. El proyecto se extendió desde 2007 a 2010, y su objetivo fue el análisis teórico, simulación, comprobación experimental y valoración económica de las acciones necesarias para reducir el consumo de energía en el ferrocarril eléctrico, incluyendo *Alta Velocidad*, metro, cercanías, tranvía y metro ligero. Durante dicho proyecto se realizaron registros en pruebas reales destinadas al ajuste y validación del modelo de simulación. En ellas se seleccionó el tren Talgo-Bombardier S-102, dotado de 1 cabeza motriz en cada extremo del tren, una potencia nominal de 8 MW, un esfuerzo de tracción máximo de 200 kN, 12 coches, una masa en vacío de 324 ton y una longitud total de 200 m.

2.2.3.1. AJUSTE DEL SIMULADOR

Las pruebas destinadas al ajuste del modelo de simulación se realizaron en dos bloques; por un lado se registraron medidas en diferentes viajes de los servicios comerciales Barcelona-Málaga y Málaga-Barcelona, con paradas en las estaciones de Antequera, Puente Genil, Córdoba, Zaragoza, Lérida y Tarragona. Por otro lado se realizaron pruebas nocturnas a lo largo de la línea Madrid-Zaragoza, específicamente diseñadas para ajustar los datos de entrada del tren y la línea. La Tabla 2-4 muestra el calendario de pruebas realizadas destinadas al ajuste del simulador.

Servicio	Tramo	Fecha	Servicio
3391	Málaga-Antequera-Puente Genil-Córdoba-Zaragoza-Lérida-Tarragona-Barcelona	20-Jul-09	Comercial
3390	Barcelona-Tarragona-Lérida-Zaragoza-Córdoba-Puente Genil-Antequera-Málaga	21-Jul-09	Comercial
3391	Málaga-Antequera-Puente Genil-Córdoba-Zaragoza-Lérida-Tarragona-Barcelona	21-Jul-09	Comercial
3390	Barcelona-Tarragona-Lérida-Zaragoza-Córdoba-Puente Genil-Antequera-Málaga	22-Jul-09	Comercial
3391	Málaga-Antequera-Puente Genil-Córdoba-La Sagra	22-Jul-09	Comercial
3390	Barcelona-Tarragona-Lérida-Zaragoza-Córdoba-Puente Genil-Antequera-Málaga	18-Aug-09	Comercial
3391	Málaga-Antequera-Puente Genil-Córdoba-Zaragoza-Lérida-Tarragona-Barcelona	18-Aug-09	Comercial
3390	Barcelona-Tarragona-Lérida-Zaragoza-Córdoba-Puente Genil-Antequera-Málaga	19-Aug-09	Comercial
3391	Málaga-Antequera-Puente Genil-Córdoba-Zaragoza-Lérida-Tarragona-Barcelona	19-Aug-09	Comercial
-	Madrid-Calatayud	29/30 agosto 2009	Nocturno
-	Calatayud-Madrid	29/30 agosto 2009	Nocturno
-	Madrid-Calatayud	30/31 agosto 2009	Nocturno
-	Calatayud-Madrid	30/31 agosto 2009	Nocturno
-	Madrid-Calatayud	20/21 septiembre 2009	Nocturno
-	Calatayud-Madrid	20/21 septiembre 2009	Nocturno

Tabla 2-4. Pruebas destinadas al ajuste del modelo de simulación durante el proyecto ELECRAIL.

En el registro de medidas se empleó un ordenador conectado al equipo de tracción de la cabeza motriz. Se utilizó un período de registro de 250 ms, y las variables registradas fueron tiempo, velocidad, esfuerzo de tracción/freno, tensión en catenaria, intensidad consumida/regenerada en catenaria, aceleración y potencia de los equipos auxiliares, como muestra la Tabla 2-5.

Registro	Espacio m	Hora hh:mm:ss	Velocidad km/h	Esfuerzo kN	Tensión catenaria V	Intensidad catenaria A	Aceleración m/s ²	Potencia auxiliares kW
0	s_0	t_0	v_0	F_0	V_0	V_0	a_0	P_0
1	$s_1 = s_0 + v_0 \Delta t_r$	$t_0 + \Delta t_r$	v_1	F_1	V_1	V_1	a_1	P_1
2	$s_2 = s_1 + v_1 \Delta t_r$	$t_0 + 2\Delta t_r$	v_2	F_2	V_2	V_2	a_2	P_2
...
i	$s_i = s_{i-1} + v_{i-1} \Delta t_r$	$t_0 + i \Delta t_r$	v_i	F_i	V_i	V_i	a_i	P_i
$i+1$	$s_{i+1} = s_i + v_i \Delta t_r$	$t_0 + (i+1) \Delta t_r$	v_{i+1}	F_{i+1}	V_{i+1}	V_{i+1}	a_{i+1}	P_{i+1}
	Registrada							
	Calculada mediante software de registro por Talgo							
	Calculada posteriormente							

Tabla 2-5. Resumen de registros embarcados.

Dado que el espacio recorrido no fue registrado directamente en las pruebas, éste se calculó a partir de los registros de velocidad, suponiéndola constante durante cada periodo de muestreo, según indica la ecuación 2.55.

$$s_{i+1} = s_i + v_i \cdot \Delta t_r \quad 2.55$$

Siendo s_{i+1} la distancia recorrida en el registro $i + 1$, s_i la distancia recorrida en el registro i , v_i la velocidad del tren en el registro i y Δt_r el periodo de muestreo.

Al usar la ecuación 2.55 se está considerando constante la velocidad entre los registros i e $i + 1$, lo cual introduce un error, que será menor cuanto menor sea el periodo de registro. Para corregirlo, se tomaron referencias absolutas en vía al inicio y fin de cada toma de medidas, con las que se corrigió la distancia recorrida de cada registro.

La Tabla 2-6 muestra la comparación entre distancias reales obtenidas mediante anotaciones del P.K. absoluto de la vía y las correspondientes calculadas con la ecuación 2.55 para un servicio concreto, así como los errores cometidos antes de realizar las correcciones mencionadas.

Trayecto	Distancia real km	Distancia calculada km	Error %
Madrid-Guadalajara	64.400	63.881	0.81%
Calatayud-Guadalajara	156.900	156.574	0.21%
P.K. 8.458-Guadalajara	55.942	55.918	0.04%
Madrid-Guadalajara	64.400	64.205	0.30%
Guadalajara-Calatayud	156.900	156.841	0.04%
Calatayud-Zaragoza	85.400	85.487	-0.10%

Tabla 2-6. Distancia real y calculada antes de corregir el error en diversos registros realizados.

Por otro lado, para calcular las pérdidas eléctricas en catenaria, se registraron simultáneamente medidas en las subestaciones de Anchuelo, Brihuega y Medinaceli durante el desarrollo de las pruebas, donde se midió la tensión en catenaria, intensidad, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, energía activa importada, energía activa exportada, energía reactiva importada, energía reactiva exportada y energía total.

A continuación se detallan los ajustes realizados en el modelo de simulación mediante las medidas tomadas.

2.2.3.1.1. Ajuste del modelo del tren

Para el ajuste del modelo del tren se puso especial atención en las curvas de esfuerzo de tracción y freno máximas, en la curva de resistencia al avance y en los rendimientos de tracción y de freno eléctrico regenerativo.

Curva de esfuerzo de tracción máximo

A pesar de que las curvas de esfuerzo de tracción y freno eléctrico máximos del Talgo-Bombardier S-102 fueron suministradas por el fabricante, se desarrollaron varias pruebas destinadas a la verificación de las mismas. Para medir el esfuerzo de tracción máximo se realizaron aceleraciones desde 0 km/h hasta 300 km/h aplicando al máximo porcentaje de tracción. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2-39.

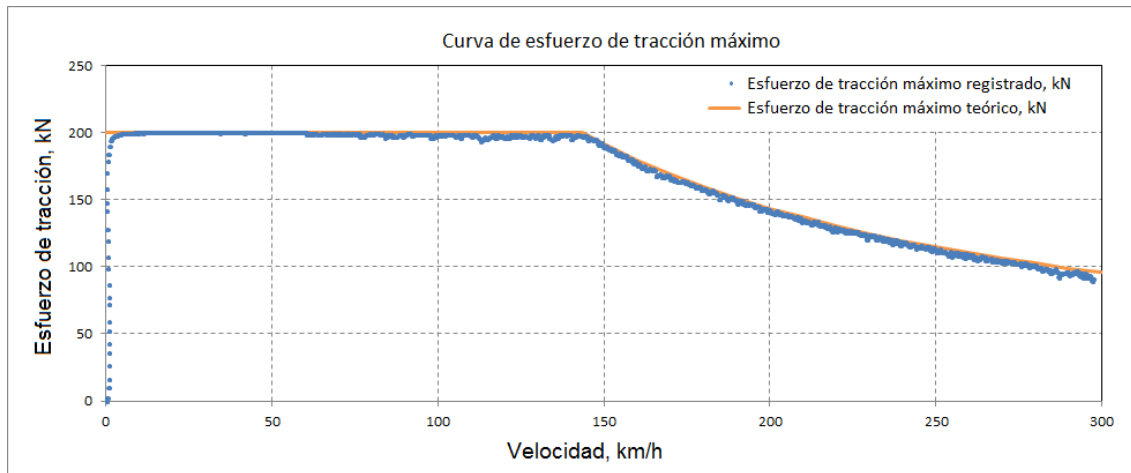


Figura 2-39. Curva de esfuerzo de tracción máximo registrado y teórico del Talgo-Bombardier S-102.

La correspondencia entre la curva teórica indicada por el fabricante y la curva registrada es casi total, con lo que se concluye que la curva de esfuerzo de tracción máxima teórica es adecuada para su uso en el modelo del tren, sin necesidad de ser corregida a la vista de las medidas realizadas.

Curva de esfuerzo de freno eléctrico máximo

De la misma manera que el esfuerzo de tracción máximo, para determinar la curva de esfuerzo de freno eléctrico máximo se realizaron diversas frenadas desde 300 km/h hasta la detención completa del tren aplicando el porcentaje de esfuerzo de freno eléctrico máximo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2-40, donde la correspondencia entre la curva de freno eléctrico máximo suministrada por el fabricante y la registrada en ensayos es casi total. No obstante, se observa que a partir de una determinada velocidad el freno eléctrico deja de ser operativo. Esta velocidad se tendrá en cuenta a la hora de calcular la energía eléctrica regenerada por el tren durante los procesos de frenado, y su valor se determinará más adelante al ajustar el rendimiento del freno eléctrico regenerativo.

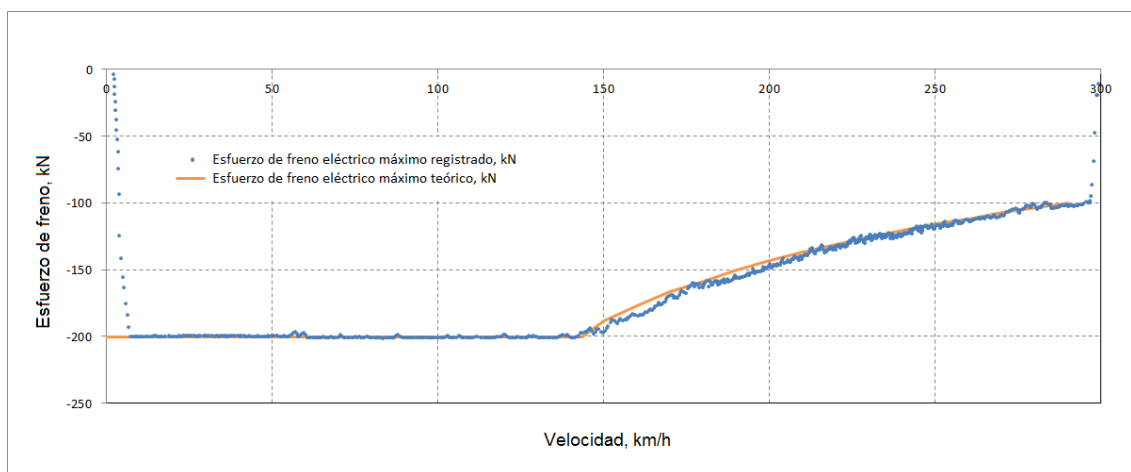


Figura 2-40. Curva de esfuerzo de freno eléctrico máximo registrado y teórico del Talgo-Bombardier S-102.

Resistencia al avance

El ajuste de la curva de resistencia al avance es crucial para la obtención precisa del consumo energético de una conducción. Para su obtención se empleó el método de deriva propuesto en (Kim, Kwon et al. 2006) y (Lukaszewicz 2007), consistente en la realización de sucesivas derivas desde la velocidad máxima permitida de la línea hasta la detención del tren.

Durante un proceso de deriva el esfuerzo de tracción aplicado por el motor es nulo, de manera que las únicas fuerzas que actúan sobre el tren son las externas, es decir, la resistencia debida a la pendiente, la resistencia debida al radio de curvatura y la resistencia al avance. Si se despeja la resistencia al avance de la ecuación 2.5 se obtiene la ecuación 2.56, que será la empleada para hallar los pares de puntos velocidad-resistencia al avance. Sobre estos puntos se ajustará una curva de la forma de la expresión de Davis (ecuación 2.24), obteniendo los valores de los parámetros A, B y C que caracterizarán la resistencia al avance del tren en función de su velocidad.

$$F_a = m_i \cdot a - F_p - F_r \quad 2.56$$

Siendo F_a la resistencia al avance, m_i la masa inercial del tren, a la aceleración, F_p la resistencia debida a la pendiente y F_r la resistencia debida al radio de curvatura.

Dado que la posición del tren durante la deriva es conocida, es posible calcular en cada registro la pendiente media, la resistencia debida a la pendiente, el radio de curvatura medio y la resistencia debida al radio de curvatura. Por otro lado, la aceleración es registrada a lo largo del proceso de deriva, con lo que sustituyendo dichos valores en la ecuación 2.56 se irán obteniendo los citados pares $(v; F_a)$.

Para la caracterización de la resistencia al avance del Talgo-Bombardier S-102 se realizaron dos tramos de deriva, el primero de ellos desde la velocidad máxima de la línea (300 km/h) hasta la parada del tren, y el segundo desde la misma velocidad hasta 24 km/h. Las curvas espacio-velocidad y perfiles de los tramos de línea correspondientes a dichas derivas se muestran en la Figura 2-41 y la Figura 2-42. El desnivel ascendido por el primer tramo de deriva fue aproximadamente el doble que el segundo, lo que provocó que la distancia recorrida durante la primera deriva fuera casi 20 km, mientras que la recorrida durante la segunda fue de alrededor de 40 km.

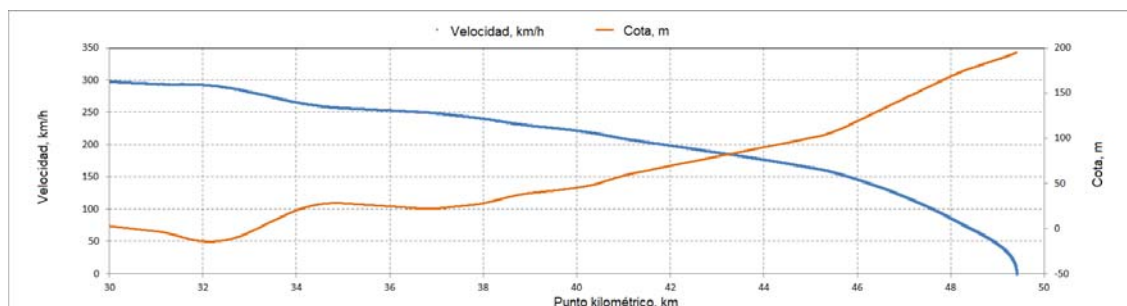


Figura 2-41. Curva espacio-velocidad y perfil de la línea del primer ensayo de deriva.

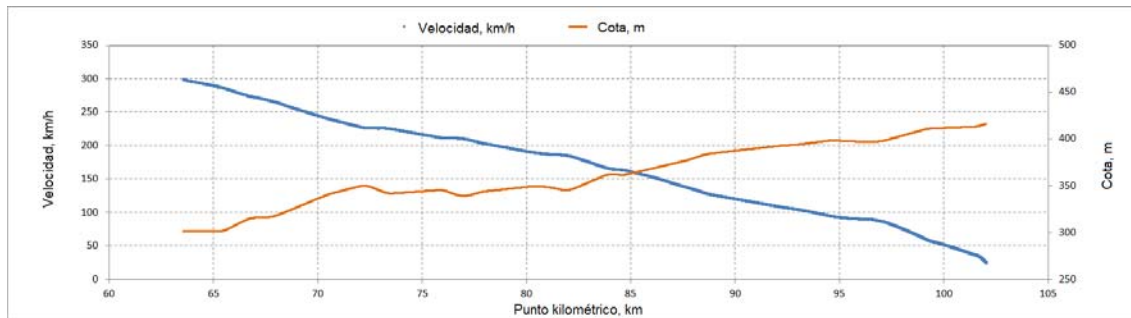


Figura 2-42. Curva espacio-velocidad y perfil de la línea del segundo ensayo de deriva.

Los valores de aceleración calculados mediante el software de registro presentaban una dispersión elevada, con lo que se optó por utilizar como valor de aceleración para cada registro la variación de velocidad en una ventana mayor de tiempo centrada alrededor del propio tiempo del registro. De este modo, para una ventana de tamaño $2n$, la aceleración en el registro i se calculará mediante la ecuación 2.57.

$$a_i = \frac{v_{i+n} - v_{i-n}}{2 \cdot n \cdot \Delta t_r} \quad 2.57$$

Para elegir el tamaño de la ventana de tiempo se llegó a un compromiso entre la reducción de ruido de medida y la pérdida de información instantánea de la misma; a mayor ventana de tiempo menor ruido pero mayor pérdida de información instantánea de la medida. Las gráficas de la Figura 2-43 muestran la velocidad, aceleración y resistencia debida a la pendiente para distintas ventanas de tiempo a la hora de calcular la aceleración; en la primera gráfica se muestran los valores de aceleración registrados mediante el software embarcado, mientras que en las siguientes se muestra la media móvil de la aceleración para ventanas de tiempo de 1, 3, 5, 10 y 20 s respectivamente.

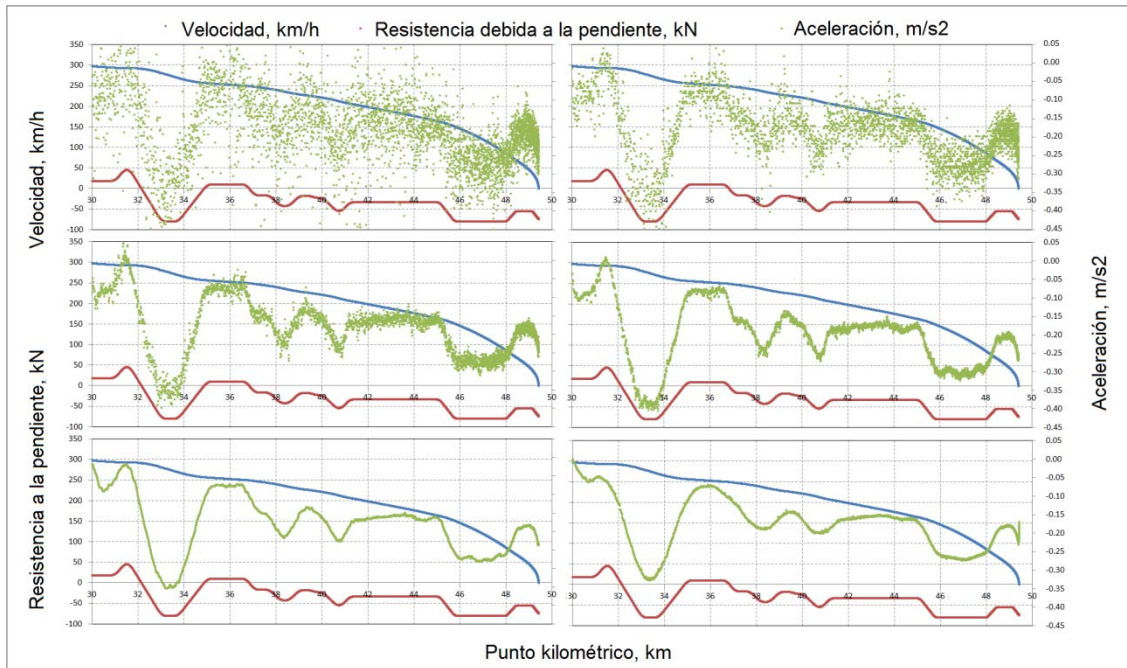


Figura 2-43. Aceleración registrada, y aceleraciones calculadas con media móvil de 1, 3, 5, 10 y 20 s respectivamente.

La ventana de tiempo de 20 s presenta un comportamiento ideal de ruido, pero muestra un claro achatamiento de las variaciones locales de aceleración, como se puede comprobar en el primer máximo local de la aceleración en el P.K. 31,5. De entre todos los valores se eligió la ventana de tiempo de 3 s como compromiso entre la reducción de ruido y la conservación del carácter instantáneo de la medida.

Una vez determinados los valores de aceleración que se emplearán para hallar los pares de valores velocidad-resistencia al avance ($v ; F_a$), es esencial la caracterización precisa de las pendiente de la línea en cada registro, la cual deberá ser calculada a partir de la posición instantánea del tren y los datos del perfil de la línea, siendo absolutamente necesario su modelado mediante radios de acuerdo entre pendientes. Tras la obtención precisa de la pendiente en cada registro, se calcula el valor de fuerza debida a la pendiente mediante la ecuación 2.27.

Con un proceso análogo se obtiene el valor del radio de curvatura en cada registro, y con éste se calcula la resistencia debida al mismo aplicando la ecuación 2.28.

Finalmente se calcula para cada registro el valor de la resistencia al avance instantáneo aplicando la ecuación 2.56, donde todos los valores son conocidos.

La Figura 2-44 y Figura 2-45 muestran los pares de valores velocidad-resistencia al avance para cada uno de los dos tramos de deriva realizados, así como los valores de la curva teórica suministrada por el fabricante. Se muestra además con una línea discontinua la curva parabólica resultante de ajustar la nube de puntos obtenida mediante el método de los mínimos cuadrados.

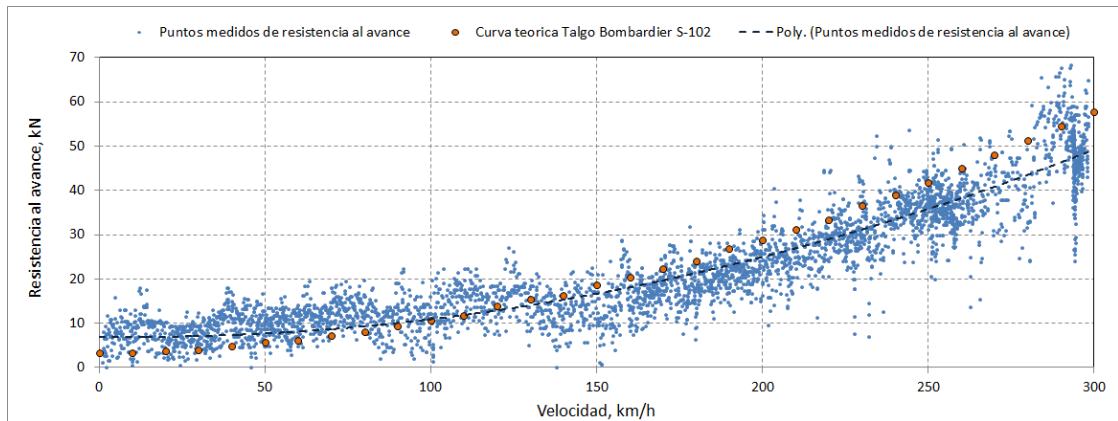


Figura 2-44. Valores de resistencia al avance, curva teórica y curva de ajuste del primer ensayo de deriva.

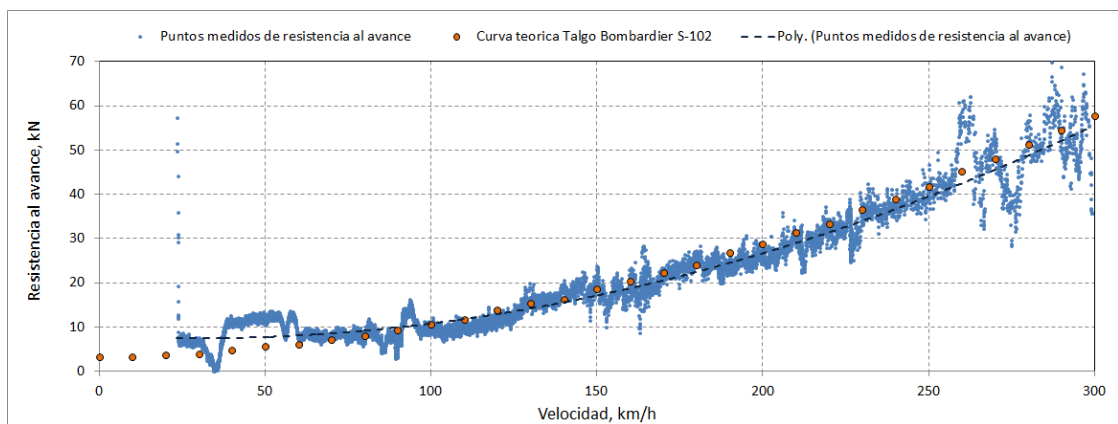


Figura 2-45. Valores de resistencia al avance, curva teórica y curva de ajuste del segundo ensayo de deriva.

La dispersión de los puntos de la Figura 2-45 es mucho menor que los de la Figura 2-44, debido a que este tramo de deriva fue de aproximadamente el doble de longitud que el anterior y por lo tanto los valores de deceleración presentaron menor dispersión. La Figura 2-46 muestra los valores de velocidad, aceleración y resistencia debida a la pendiente del segundo tramo de deriva para una ventana de tiempo para el cálculo de la aceleración de 3 s, al igual que en el primer tramo de deriva.

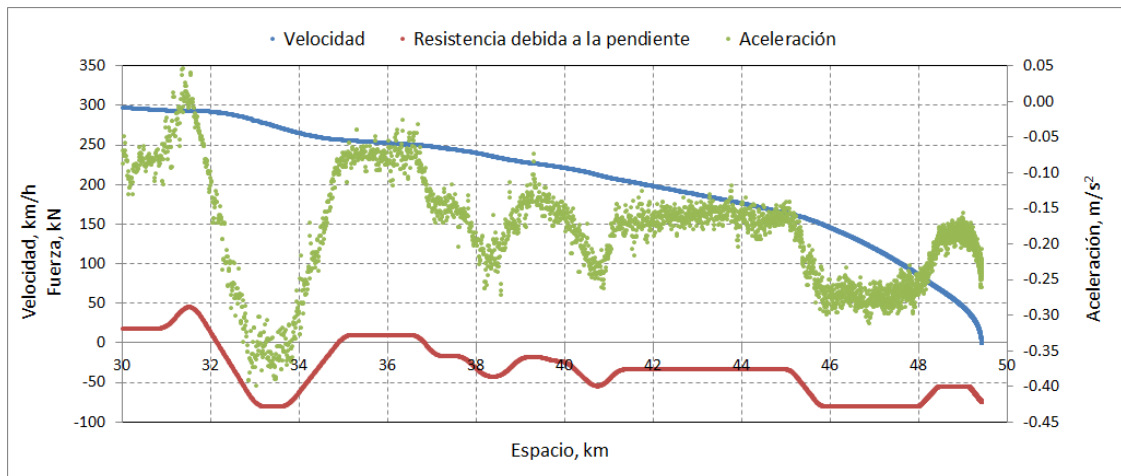


Figura 2-46. Aceleración media móvil de ventana 3 s.

Una vez obtenidos los puntos de resistencia al avance para los dos ensayos de deriva se obtuvieron los parámetros A, B y C de la curva de Davis (Kim, Kwon et al. 2006), datos de entrada que definirán la resistencia al avance dependiente de la velocidad (ecuación 2.24).

La Figura 2-47 muestra la curva de ajuste final, que difiere ligeramente de la curva teórica proporcionada por el fabricante. La curva de resistencia ajustada presenta valores mayores que la teórica a velocidades bajas y menores a velocidades altas, lo que tendrá consecuencias significativas en el cálculo de la energía consumida, ya que normalmente los trenes circularán a velocidades altas durante la mayor parte de los servicios.

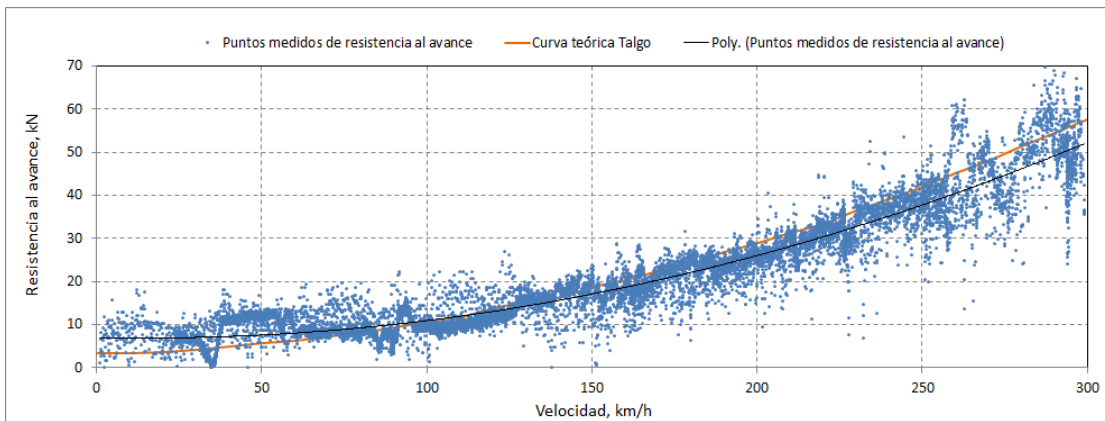


Figura 2-47. Valores de resistencia al avance, curva teórica y curva de ajuste final.

Rendimiento eléctrico de tracción

Para caracterizar el rendimiento global de tracción en función de la velocidad y el porcentaje de esfuerzo, se realizaron cuatro ensayos de tracción desde el tren parado hasta una velocidad de 300 km/h, a porcentajes de tracción del 25%, 50%, 75% y 100% (Figura 2-48).

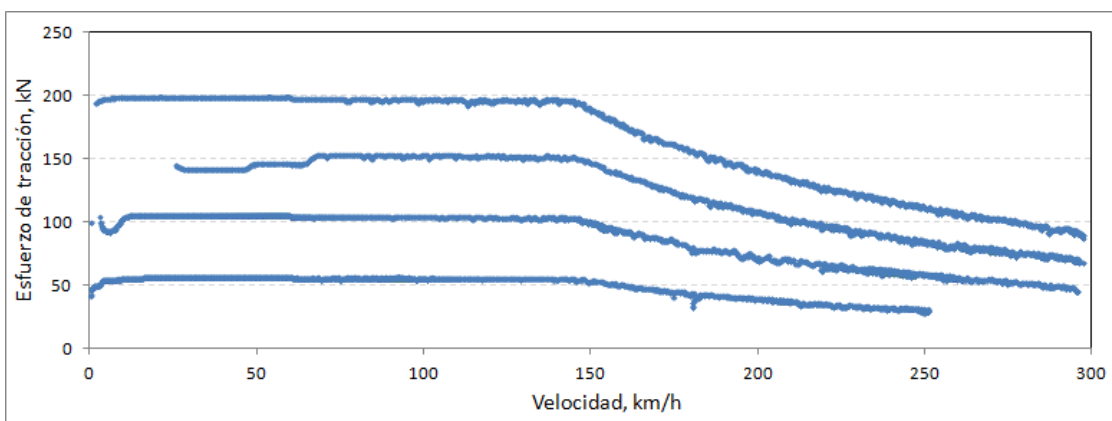


Figura 2-48. Ensayos de tracción a diferente porcentaje de esfuerzo.

El rendimiento de tracción se calcula despejándolo de la ecuación 2.42, obteniendo la ecuación 2.58.

$$\eta_t = \frac{F \cdot v}{P - P_{aux}} \quad 2.58$$

Siendo η_t el rendimiento de tracción, F el esfuerzo, v la velocidad, P_{aux} la potencia eléctrica consumida por los equipos auxiliares, y P la potencia eléctrica activa en catenaria, calculada según la ecuación 2.59.

$$P = U \cdot I \cdot \cos\theta \quad 2.59$$

Siendo U e I la tensión e intensidad en catenaria respectivamente, y $\cos\theta$ el factor de potencia.

La Figura 2-49 muestra los valores de rendimiento de tracción obtenidos en función de la velocidad para cada porcentaje de esfuerzo ensayado. Se observa que el rendimiento de tracción aumenta con la velocidad. Por otro lado, la dependencia del porcentaje de esfuerzo no es concluyente, y por lo tanto se decide modelar el rendimiento de tracción únicamente en función de la velocidad.

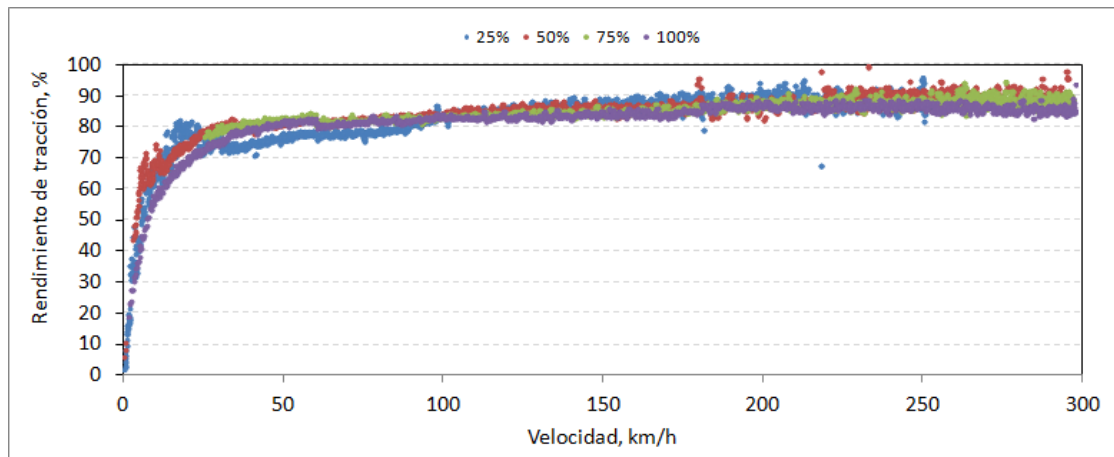


Figura 2-49. Rendimiento de tracción en función de la velocidad para diferentes porcentajes de esfuerzo de tracción.

Rendimiento del freno eléctrico regenerativo

Para ajustar el rendimiento de freno eléctrico regenerativo se realizaron ensayos análogos a los anteriores durante procesos de frenado desde 300 km/h hasta la detención del tren.

La Figura 2-50 muestra el rendimiento de freno eléctrico en función de la velocidad para el porcentaje de freno máximo. A velocidades reducidas el rendimiento de freno eléctrico decrece bruscamente, siendo nulo a unos 10 km/h, donde ya no es posible su uso. Este valor será tenido en cuenta en el simulador a la hora de hallar la energía regenerada por el tren. A la vista de los resultados obtenidos, se decide modelar el rendimiento de freno como función dependiente únicamente de la velocidad.

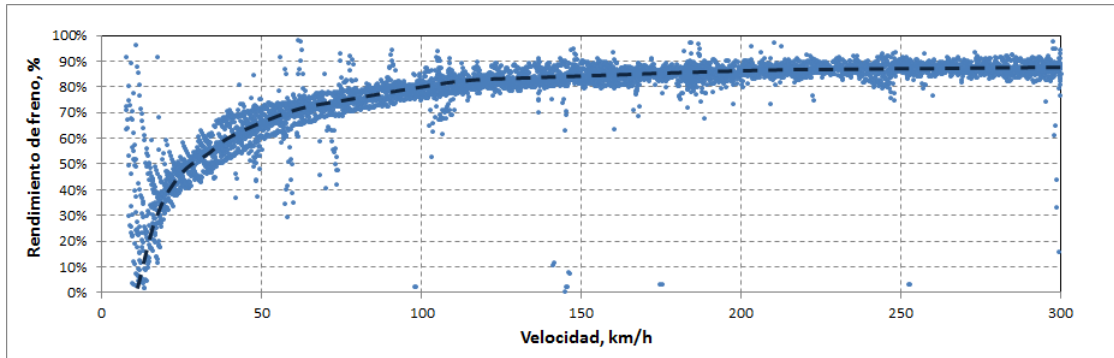


Figura 2-50. Rendimiento de freno en función de la velocidad a porcentaje de esfuerzo máximo.

Consumo de equipos auxiliares

El consumo de los equipos auxiliares fue registrado durante algunas de las pruebas nocturnas. La Figura 2-51 muestra la potencia eléctrica de los equipos auxiliares a lo largo de los trayectos Madrid-Guadalajara, Guadalajara-Calatayud y Calatayud-Zaragoza, donde se aprecia la limitación de la potencia de los equipos auxiliares al atravesar zonas neutras. Sin embargo, no se aprecia relación aparente entre dicha potencia y la velocidad del tren.

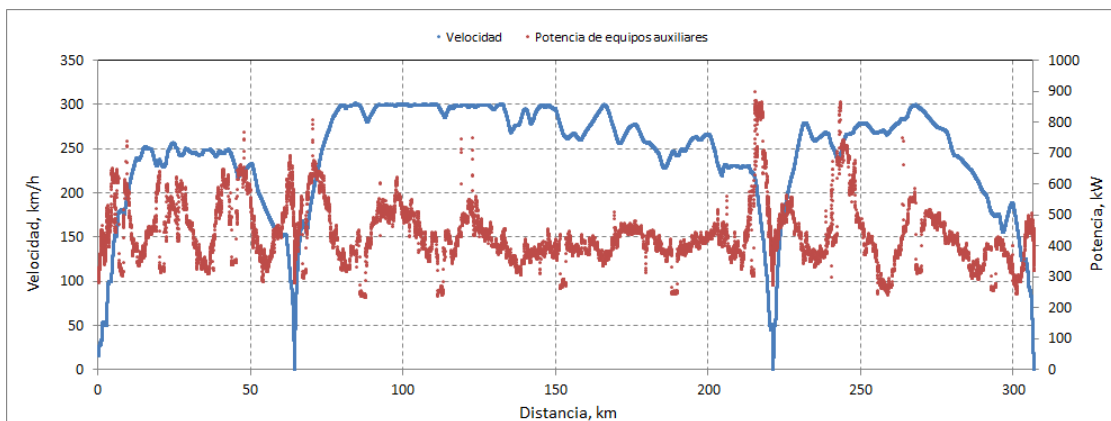


Figura 2-51. Potencia de equipos auxiliares registrada durante el servicio Madrid-Zaragoza, 10 noviembre 2009.

La Figura 2-52 muestra la potencia de equipos auxiliares durante las paradas en estación en el servicio comercial diurno Barcelona-Málaga del 21 de julio de 2009. A la vista de estas medidas, se decidió modelar el consumo de los equipos auxiliares como un valor constante de potencia, lo que es corroborado en (García 2007), donde se afirma que el consumo de los servicios auxiliares no tiene una relación directa con la velocidad. Dada la influencia de los equipos de aire acondicionado en el consumo de los equipos auxiliares, dicho valor deberá ser ajustado dependiendo de la época del año.

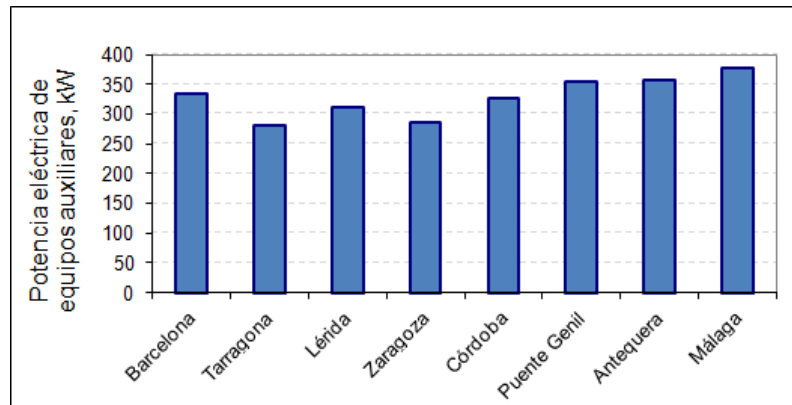


Figura 2-52. Potencia de equipos auxiliares durante parada en estación durante el servicio Barcelona-Málaga, 21 julio 2009.

Por este motivo, si se representa la curva de Pareto de un trayecto en una gráfica tiempo-consumo, dicha curva presentará un mínimo para un tiempo de recorrido concreto, a partir del cual el consumo no disminuye sino que aumenta debido al consumo de auxiliares. Cuanto mayor sea la potencia nominal de los equipos auxiliares, dicho mínimo se producirá para un tiempo de recorrido menor, como se puede observar en la Figura 2-53, donde se han representado tres curvas de Pareto, cada una de ellas para un valor diferente de potencia nominal de los equipos auxiliares. No obstante, dado el orden de magnitud normal de la potencia nominal de equipos auxiliares en relación a la potencia nominal de tracción de los trenes de *Alta Velocidad*, la zona de trabajo en la curva de Pareto de los servicios ferroviarios de *Alta Velocidad* estará siempre localizada en el tramo descendente.

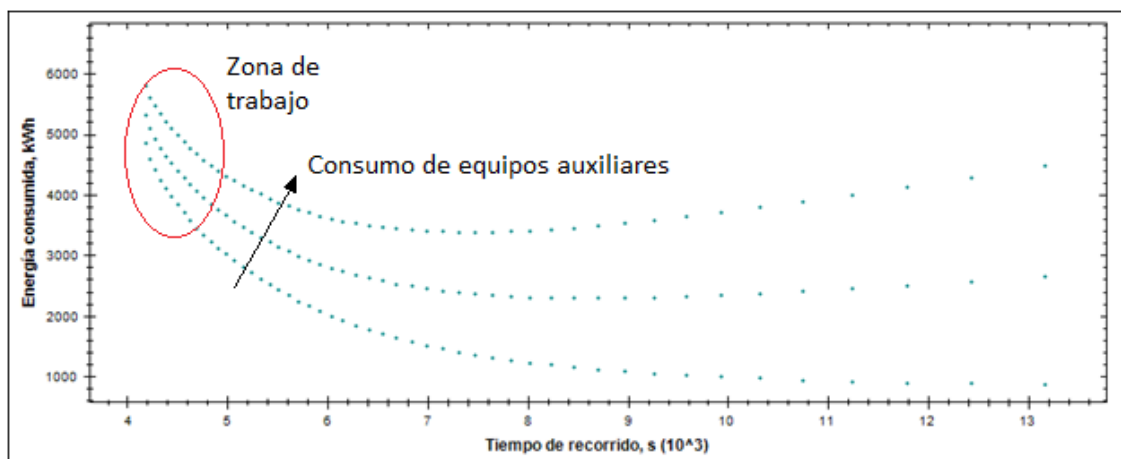


Figura 2-53. Influencia del consumo de los equipos auxiliares al aumentar el tiempo de recorrido.

2.2.3.1.2. Ajuste del modelo de la línea

Se decidió ajustar el tramo de línea entre Madrid y Zaragoza, ya que ese sería el tramo elegido para diseñar conducciones eficientes.

Zonas neutras tramo Madrid-Zaragoza

El ajuste fino de la longitud de las zonas neutras es esencial para el cálculo preciso del tiempo de recorrido y el consumo energético, ya que durante las mismas se pierde

tiempo y no se consume energía. Durante la toma de medidas se comprobó que la longitud efectiva de las mismas era considerablemente mayor que la indicada en los datos disponibles, correspondientes al proyecto básico de construcción. Por lo tanto se corrigió la localización de los puntos kilométricos de inicio y fin de cada una de ellas.

Sirva de ejemplo la primera zona neutra del lado Madrid, donde en el proyecto básico se indicaba que sus puntos kilométricos de inicio y fin eran respectivamente 7,081 y 7,463, totalizando una longitud de la zona neutra de 382 m. Sin embargo, durante los registros se detectó que la zona neutra se extendía entre los puntos kilométricos 6,613 y 8,014, totalizando una longitud de 1401 m, un 367% mayor.

Además, durante las zonas neutras el tren aplica automáticamente un porcentaje de freno constante con el fin de regenerar la suficiente energía para abastecer a los equipos auxiliares, lo que ha sido incorporado al modelo de simulación. Este hecho se muestra en la Figura 2-54, donde se aprecia la diferencia entre la tracción nula propia de los procesos de deriva, y el esfuerzo de freno aplicado durante las zonas neutras.

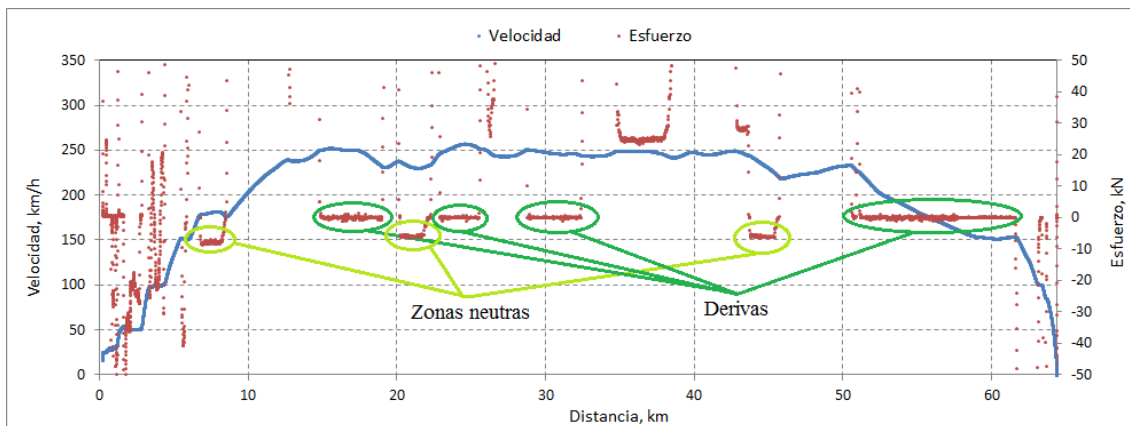


Figura 2-54. Velocidad y esfuerzo registrado en el trayecto Madrid-Guadalajara, 10 noviembre 2009.

Túneles

Dada la escasez de registros tomados bajo la influencia de túneles, no fue posible el ajuste del factor de túnel para cada uno de ellos, de manera que se decidió emplear un valor por defecto de 1,5 (Lechelle and Mouneimne 2010), valor que se comprobó adecuado, comprobando que los perfiles de velocidad registrados al atravesar túneles durante las pruebas realizadas eran similares a los perfiles de velocidad replicados en el simulador con este valor de factor de túnel.

2.2.3.1.3. Ajuste de los parámetros del modelo de simulación

Además de los ajustes realizados en los modelos del tren y de la línea, se realizó el ajuste de diversos parámetros utilizados en el modelo de simulación.

Esfuerzo de freno en Zonas Neutras

Durante las pruebas realizadas se midió el esfuerzo de freno aplicado por el tren al atravesar zonas neutras. Tras el análisis de los registros obtenidos se decidió modelar dicho esfuerzo como una constante de valor $3.400 N$.

Velocidad de corte del freno eléctrico regenerativo

A velocidades inferiores a 10 km/h , el Talgo-Bombardier S-102 no podrá seguir utilizando el freno eléctrico regenerativo (Figura 2-50).

Deceleración de servicio

Durante los registros en servicios comerciales se analizó la deceleración de las curvas de freno realizadas por los maquinistas para ajustar la deceleración de servicio. La Figura 2-55 muestra diversos puntos de la aceleración registrada de la curva de freno de entrada a la estación de Tarragona en el servicio Barcelona-Málaga del 21 de julio de 2009. Por ello, el modelo de simulación utilizará un valor de deceleración de servicio constante e igual a $0,4 \text{ m/s}^2$.

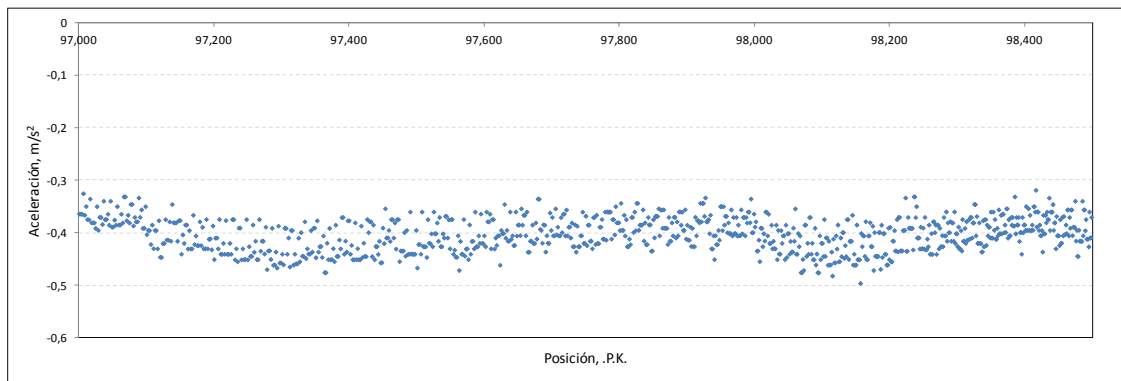


Figura 2-55. Deceleración de freno de entrada a la estación de Tarragona en el servicio Barcelona-Málaga, 21 julio 2009.

2.2.3.2. VALIDACIÓN DEL SIMULADOR

Tras el ajuste del modelo de simulación, el siguiente requisito para poder emplearlo en el diseño de conducciones eficientes es que garantice la precisión en sus cálculos de tiempos de recorrido y consumos energéticos. Para ello se compararon los resultados obtenidos en los registros de conducciones con los resultados obtenidos mediante la simulación de las mismas.

Para la validación se utilizó un tramo correspondiente a un arranque a porcentaje de esfuerzo máximo hasta alcanzar una velocidad de 220 km/h , seguido de un tramo deriva. La Figura 2-56 muestra las curvas de velocidad y esfuerzo de tracción en función de la posición del tren, tanto de las medidas registradas durante las pruebas como de las obtenidas mediante el simulador.

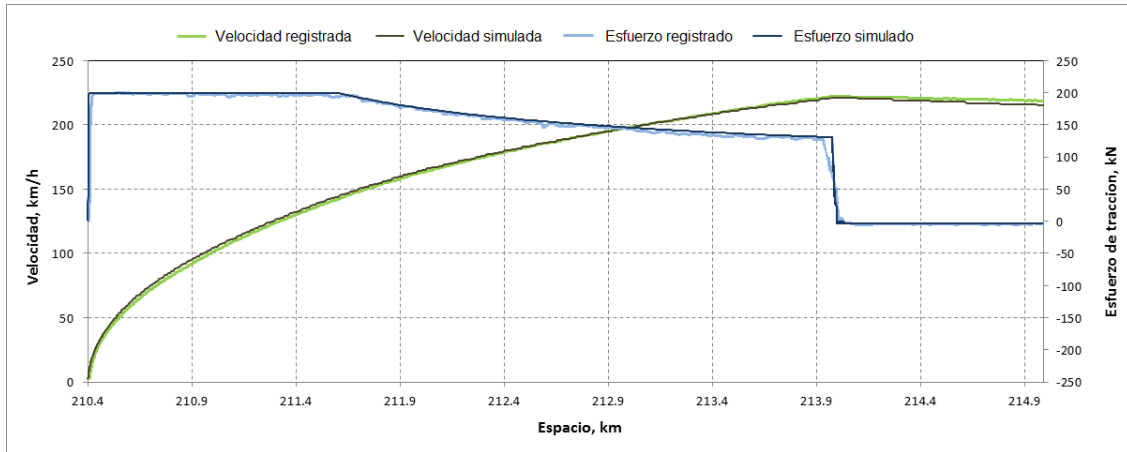


Figura 2-56. Validación del modelo de simulación en un tramo del trayecto Madrid-Calatayud, 20 septiembre 2009.

La diferencia en tiempos de recorrido entre la conducción real y la simulada fue de 1 s, un 0,75% del total. Por otro lado, la diferencia en consumo energético bruto en catenaria fue de 686 Wh, un 0,35% del total (Tabla 2-7).

Tiempo de recorrido simulado (hh:mm:ss)	Tiempo de recorrido registrado (hh:mm:ss)	Diferencia de tiempo (%)	Consumo bruto simulado en pantógrafo (kWh)	Consumo bruto registrado en pantógrafo (kWh)	Diferencia de consumo (%)
0:02:12	0:02:13	0,75%	196,657	195,971	-0,35%

Tabla 2-7. Resultados de validación del modelo de simulación.

Dichas diferencias pueden ser en parte explicadas por la pequeña discrepancia existente entre la curva de tracción real y la curva de tracción simulada, luego previsiblemente las diferencias reales entre el tiempo de recorrido y consumo energético simulado y real serán aún menores. Estos valores permiten concluir que tanto el modelo de simulación como el ajuste realizado para las condiciones concretas de simulación (conducciones realizadas con el tren Talgo-Bombardier S-102 a lo largo de la línea de *Alta Velocidad* Madrid-Zaragoza) son lo suficientemente precisos como para cumplir el cometido para el que fue construido; el diseño de conducciones manuales eficientes.

Este nivel de precisión en el modelo de simulación se ha considerado fundamental en esta tesis por los siguientes motivos:

- Los estrictos compromisos de puntualidad exigidos en los servicios ferroviarios de Alta Velocidad requieren que los tiempos de recorrido calculados sean lo más precisos posibles.
- El potencial de ahorro energéticos asociado al diseño óptimo de horarios está situado en torno al 5%, como se mostrará en el capítulo tercero, luego se necesita una precisión en el cálculo de consumos energéticos inferior a este valor.
- Como se mostrará en el caso ejemplo del presente capítulo, se diseñaron y aplicaron conducciones manuales en servicios comerciales, lo que supuso un

requisito previo con la empresa operadora, en este caso Renfe, de que los cálculos realizados por el simulador fueran lo suficientemente precisos.

Una muestra del modelo de simulación funcionando en modo tiempo real se puede ver en el siguiente enlace: “<https://www.youtube.com/watch?v=ci5SWUbEVf4>”.

2.2.4. ANÁLISIS DEL SIMULADOR

En esta sección se analizarán los resultados obtenidos con el simulador, y la influencia de determinadas partes del modelo del mismo. Para todas las simulaciones se ha utilizado el tren Talgo-Bombardier S-102 y la línea Madrid-Zaragoza.

- Acuerdos entre pendientes

Para comprobar la influencia de los acuerdos entre pendientes sobre el tiempo de recorrido y el consumo energético, se simularon distintas conducciones considerando al tren como una masa puntual y distinguiendo entre utilizar radios de acuerdo o no utilizarlos, como muestra la Figura 2-57, donde se aprecian diferencias pequeñas tanto en tiempo de recorrido como en consumo energéticos. No se aprecia una tendencia constante en cuanto al tiempo de recorrido, probablemente debido a que los acuerdos cóncavos compensan a los convexos y viceversa. En cuanto a los consumos energéticos, éstos son ligeramente mayores al no considerar los acuerdos entre pendientes.

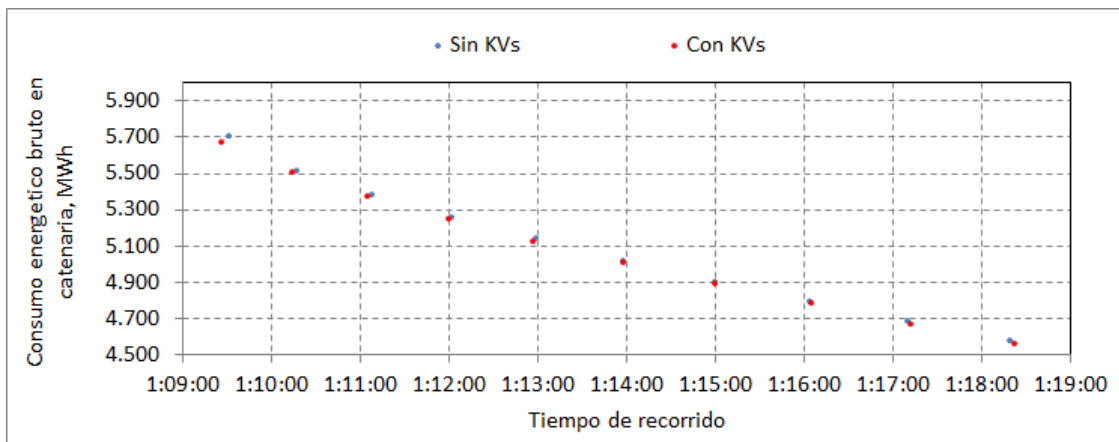


Figura 2-57. Diferencia de tiempos de recorrido y consumos energéticos al aplicar radios de acuerdo entre pendientes o no aplicarlos.

La Tabla 2-8 muestra las diferencias medias entre pares de conducciones análogas. El error cometido no es tan sensible en tiempo de recorrido como en consumo energético.

Radios de acuerdo	Variación de tiempo, %	Variación de consumo, %
No	-	-
Si	0.050%	0.372%

Tabla 2-8. Variación de tiempos de recorrido y consumos energéticos al considerar radios de acuerdo entre pendientes.

- Trazado en planta

Para comprobar la influencia del trazado en planta en los resultados de tiempos de recorrido y consumos energéticos, se simuló una conducción en el trayecto Madrid-Zaragoza. La Figura 2-58 muestra el tiempo de recorrido y consumo energético simulados en el caso de considerar las curvas del trazado en planta y en el caso de no considerarlas.

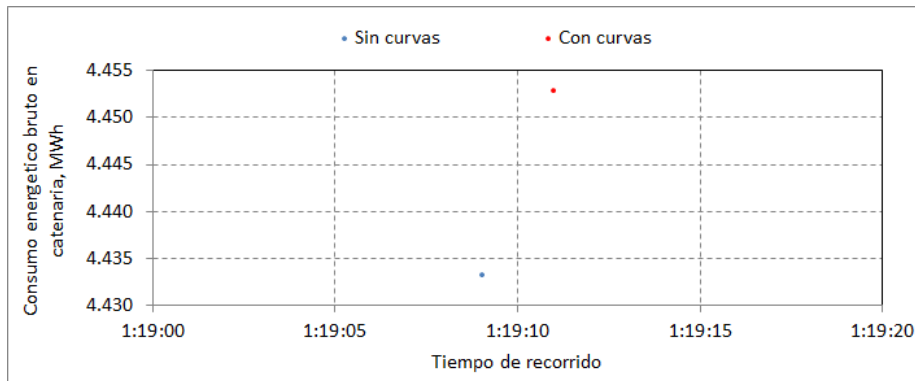


Figura 2-58. Influencia del trazado en planta, simulaciones de la misma conducción en el trayecto Madrid-Zaragoza.

Al considerar el trazado en planta de la línea, tanto el tiempo de recorrido como el consumo energético aumentaron. El aumento del tiempo de recorrido fue de apenas 2 s, un 0,04% del tiempo total del trayecto. En cambio, el aumento en consumo, de un orden de magnitud mayor, fue de 19,513 kWh, un 0,44%.

El trazado en planta de las líneas de *Alta Velocidad* españolas se diseña con curvas de radios de curvatura amplios (en este trayecto hay 65 tramos de curva puros, con un radio de curvatura medio de 7.200 m), de manera que las resistencias debidas al radio de curvatura no son tan elevadas como lo pueden ser en sistemas metropolitanos. La Figura 2-59 muestra los valores de resistencia al avance, resistencia debida a la pendiente y resistencia debida al radio de curvatura en función de la posición de la conducción anterior, donde se aprecia que la resistencia debida al radio de curvatura es despreciable en comparación con las otras dos (en torno al 1% en valor medio).

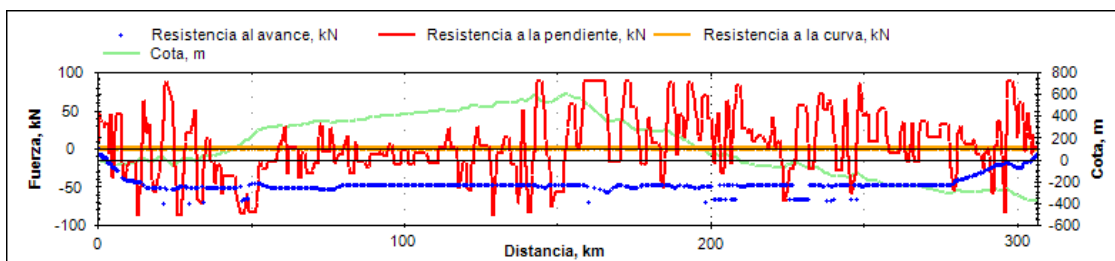


Figura 2-59. Fuerzas externas durante una conducción estándar en el trayecto Madrid-Zaragoza.

- Longitud del tren

Como ya se detalló en la descripción del modelo del tren, el hecho de considerar la longitud del tren en la simulación tiene implicaciones tanto en el cálculo de la pendiente media instantánea como en la posición efectiva de los cambios de límites

de velocidad máxima. La Figura 2-60 muestra un conjunto de simulaciones de la misma conducción realizadas a lo largo del trayecto Madrid-Zaragoza para diferentes valores de longitud del tren, donde se puede comprobar que las diferencias de tiempos de recorrido fueron significativas y despreciables las de consumo energético (Tabla 2-9).

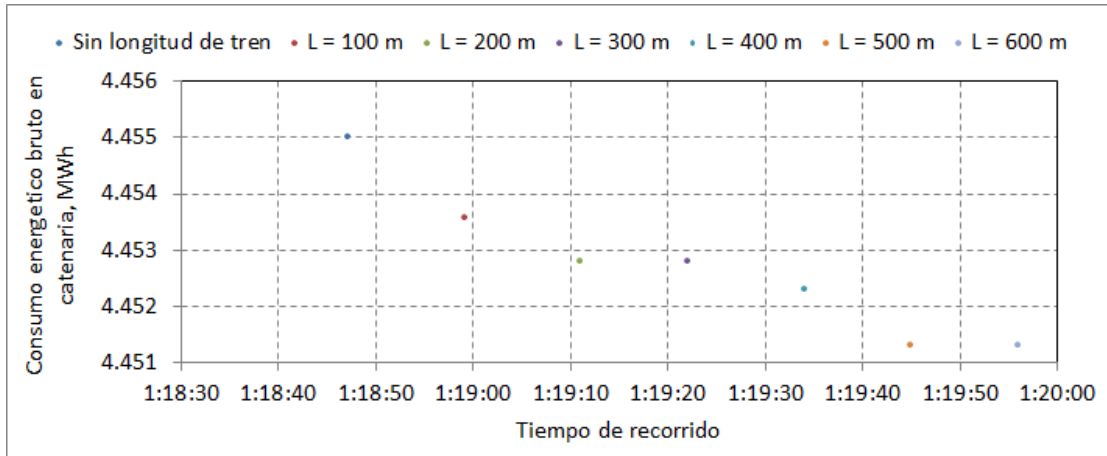


Figura 2-60. Simulación de la misma conducción a lo largo del trayecto Madrid-Zaragoza para diferentes longitudes de tren.

El hecho de que al aumentar la longitud del tren aumente el tiempo de recorrido se explica porque en los aumentos de límite de velocidad máxima el tren no puede acelerar mientras la cola del tren no haya rebasado el cambio de límite, y cuanto mayor sea la longitud del tren más se tardará en cumplir dicha condición (Figura 2-22).

El principal motivo para tener en cuenta la longitud del tren no es la precisión de la simulación, sino garantizar que tanto la cabeza como la cola del tren cumplen con las restricciones de velocidad del servicio.

Longitud del tren, m	Tiempo, hh:mm:ss	Consumo, MWh	Variación de tiempo, %	Variación de consumo, %
-	1:18:47	10:55:17	-	-
100	1:18:59	10:53:10	0.25%	-0.03%
200	1:19:11	10:52:05	0.51%	-0.05%
300	1:19:22	10:52:04	0.74%	-0.05%
400	1:19:34	10:51:21	0.99%	-0.06%
500	1:19:45	10:49:54	1.23%	-0.08%
600	1:19:56	10:49:54	1.46%	-0.08%

Tabla 2-9. Variación de tiempos de recorrido y consumos energéticos al variar la longitud del tren.

- Longitud del tren y acuerdos entre pendientes

Al considerar conjuntamente los acuerdos entre pendientes y la longitud del tren, la pendiente instantánea p del tren se calcula aplicando la media ponderada de las pendientes en todos aquellos sectores en los que se encuentre el tren.

La cabeza del tren es la primera en experimentar un cambio de pendiente, que irá transmitiéndose hasta la cola a medida que avance. De esta forma, la pendiente instantánea p tendrá un valor comprendido entre la pendiente de la cabeza y la

pendiente de la cola del tren. Cuando todo el tren se encuentra dentro del sector central de un tramo de pendiente, entonces las tres coincidirán, como se muestra en la Figura 2-61. En el enlace “<https://www.youtube.com/watch?v=OeQlgwST1mM>” se muestra un video del simulador que muestra la variación de estos tres valores de pendiente durante el proceso de una simulación.

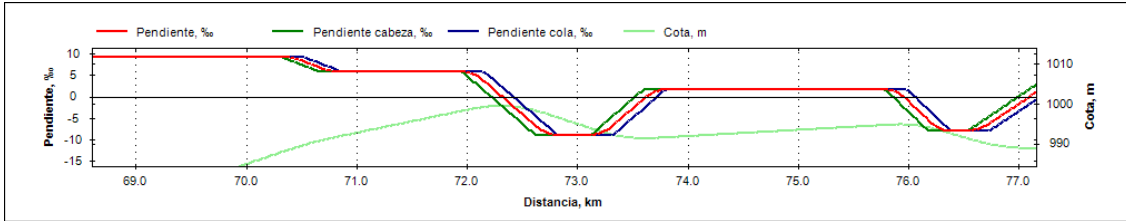


Figura 2-61. Variación de la pendiente en cabeza y cola del tren a lo largo de una línea modelada con acuerdos entre pendientes y con un tren de longitud L .

La Figura 2-62 muestra lo mismo que la Figura 2-61 para un modelo de línea sin acuerdos entre pendientes, donde se pueden apreciar las transiciones bruscas entre ellas.

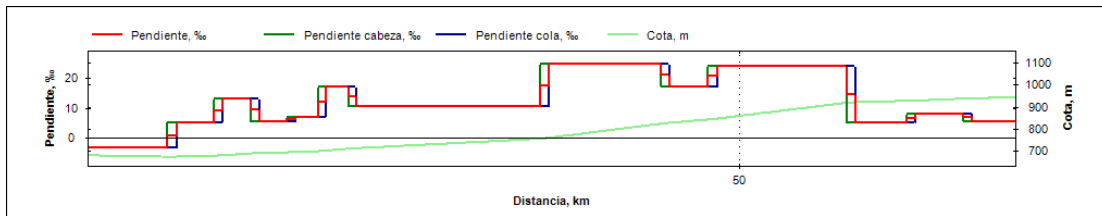


Figura 2-62. Variación de la pendiente en cabeza y cola del tren a lo largo de una línea modelada sin acuerdos entre pendientes y con un tren de longitud L .

Para comprobar la diferencia entre simulaciones realizadas considerando conjuntamente los acuerdos entre pendientes y la longitud del tren se realiza la simulación de una conducción estándar entre Madrid y Guadalajara. Las diferencias en tiempo de recorrido y consumo energético se muestran en la Figura 2-63 y la Tabla 2-10, comprobando que no son despreciables.

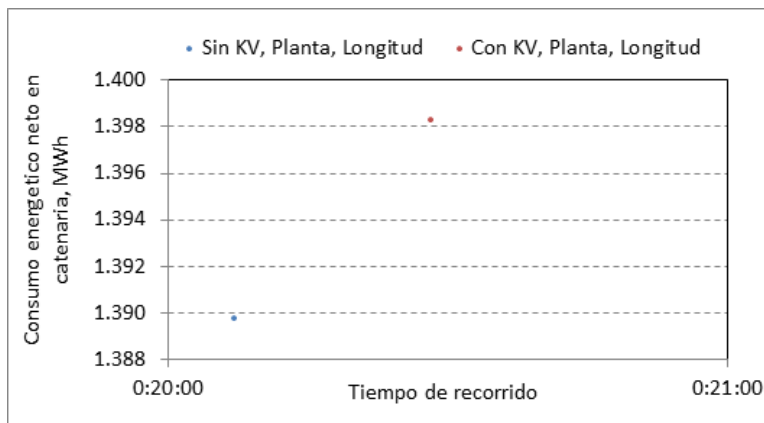


Figura 2-63. Tiempo de recorrido y consumo energético neto en catenaria en el trayecto Madrid-Guadalajara considerando conjuntamente acuerdos entre pendientes, curvas y longitud del tren.

KV, Planta, Longitud	Variación de tiempo, %	Variación de consumo, %
No	-	-
Si	1.74%	0.616%

Tabla 2-10. Variación de tiempo de recorrido y consumo energético neto en pantógrafo, trayecto Madrid-Guadalajara.

- Paso de simulación

Finalmente se analiza la influencia del paso de simulación del simulador. Para ello se realizan diferentes simulaciones de una misma conducción en el trayecto Madrid-Zaragoza, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 2-64.

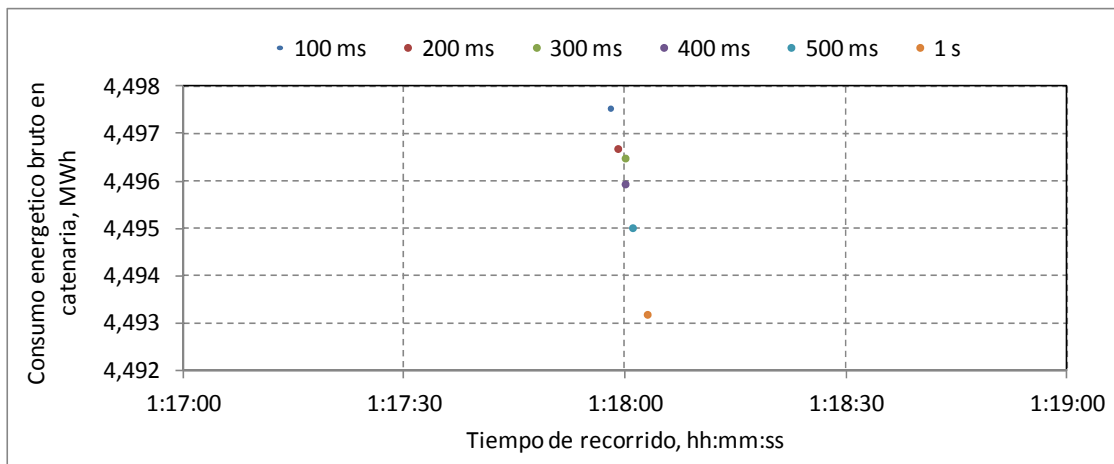


Figura 2-64. Tiempo de recorrido y consumo energético bruto en pantógrafo en el trayecto Madrid-Zaragoza para diferentes pasos de simulación.

Como se indicó en la introducción, al considerar que la aceleración del tren se mantiene constante durante cada paso de simulación se comete un error, que será menor cuanto menor sea dicho paso. En todas las simulaciones realizadas se ha utilizado un paso de simulación $\Delta t = 250 \text{ ms}$.

- Análisis de conducciones manuales

En esta sección se analizarán las diferentes estrategias de conducción manual con el objetivo de identificar las más eficientes. Con la información extraída se elaborará el modelo de conducción que utilizará el algoritmo de optimización de conducciones eficientes.

En primer lugar se analizará mediante simulación la situación óptima de la deriva final en un trayecto. Como se citó en la introducción, la conducción óptima en un tramo llano consiste en un tramo de regulación de velocidad y un tramo de deriva final (Ichikawa 1968). En una conducción de estas características, los dos únicos parámetros que definen la conducción son el valor de la velocidad de regulación y el punto de inicio de la deriva final. La Figura 2-65 muestra el perfil de velocidad de distintas conducciones en llano con una velocidad de regulación constante de 280 km/h, donde se ha aplicado un tramo de deriva de 5000 m cuya localización varía a lo

largo del trayecto hasta el final del mismo (en los casos en que la curva de freno corta al tramo de deriva final, la longitud de éste será menor). Por generalidad del estudio, se analiza el efecto en las distintas posiciones desde el comienzo de línea aunque sólo tengan sentido las derivas aplicadas cerca del final del trayecto.

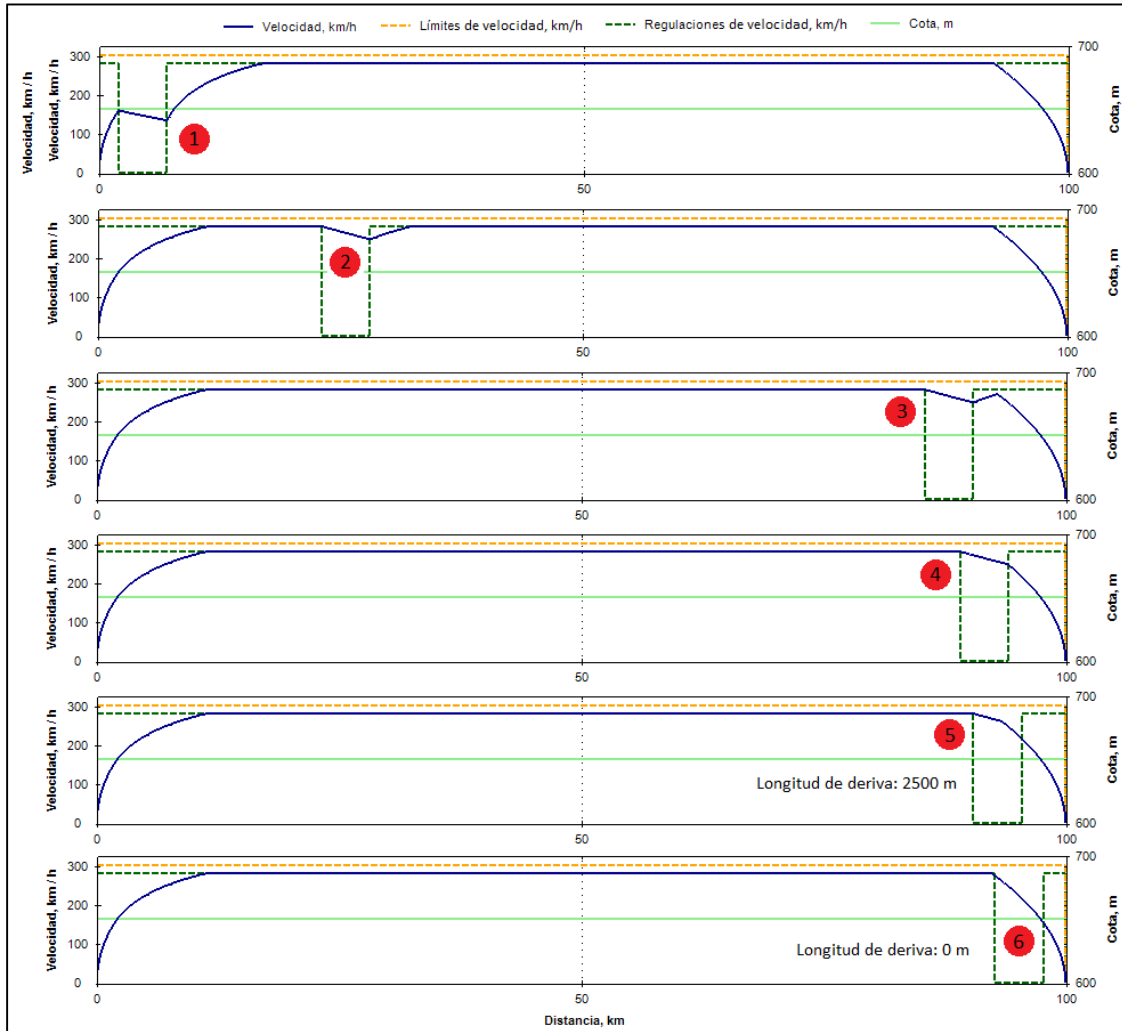


Figura 2-65. Perfiles de velocidad con barrido de deriva en línea horizontal de 100 km.

La Figura 2-66 muestra el consumo energético bruto en pantógrafo de las diferentes conducciones generadas anteriormente. Realizar la deriva durante el tramo de aceleración inicial hace aumentar el tiempo de recorrido (conducción 1), tiempo que será menor cuanto más cercana sea la velocidad del tren a la velocidad de regulación en la posición de comienzo de la deriva. Llega un punto en que la totalidad del tramo de deriva se realiza una vez el tren ha alcanzado la velocidad de regulación, recuperando el tren posteriormente la velocidad perdida hasta alcanzar de nuevo la misma velocidad de regulación. Todas las conducciones que cumplen esto presentan el mismo tiempo de recorrido y consumo energético (conducción 2). Al seguir avanzando la posición de comienzo del tramo de deriva a lo largo del trayecto, llega un momento en que, a pesar de lograr aplicar el tramo de deriva en su totalidad, el tren posteriormente no dispone de la distancia suficiente para recuperar la velocidad de regulación puesto que se topa con la curva de freno de entrada en estación (conducción 3), ahorrando un tramo de tracción que será mayor cuanto más tarde

comience dicha deriva. Durante este tramo también decrece el tiempo de recorrido, ya que el espacio en que el tren lleva una velocidad inferior a la velocidad de regulación es cada vez menor. Al seguir avanzando el comienzo del tramo de deriva llega una conducción en la que justo al finalizar dicha comienza la curva de freno (conducción 4), conducción que estará caracterizada por el mínimo consumo. A partir de entonces, el tramo de deriva realizado será cada vez más corto, ya que será interrumpido por la curva de freno, con lo que el consumo energético comenzará a aumentar y el tiempo de recorrido a disminuir (conducción 5). Llega un momento en que no se puede aplicar el tramo de deriva puesto que su punto de comienzo es posterior al punto de comienzo de la curva de freno. Dicha conducción es equivalente a la marcha de regulación sin el tramo de deriva final, que produce el máximo consumo energético y mínimo tiempo de recorrido (conducción 6).

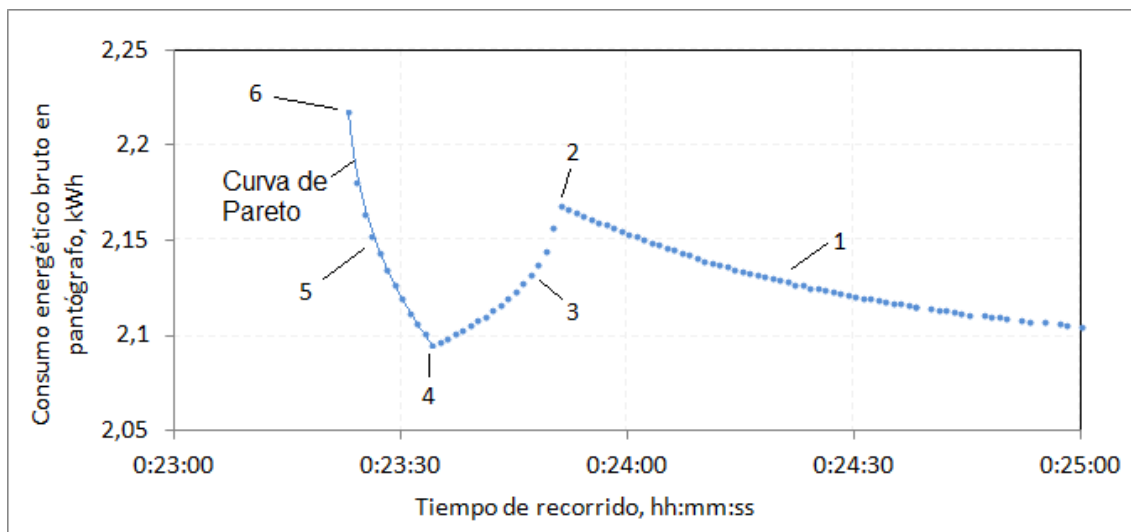


Figura 2-66. Tiempo de recorrido y consumo energético bruto en pantógrafo de conductas simuladas en una línea horizontal de 100 km.

Repitiendo el barrido de deriva anterior para una longitud de deriva de 15000 m y superponiendo los resultados a los anteriores se obtienen las curvas de la Figura 2-67. Ambas curvas tienen la misma forma, y además comparten el tramo de curva de Pareto cuyo tiempo de recorrido es inferior a 0:23:34.

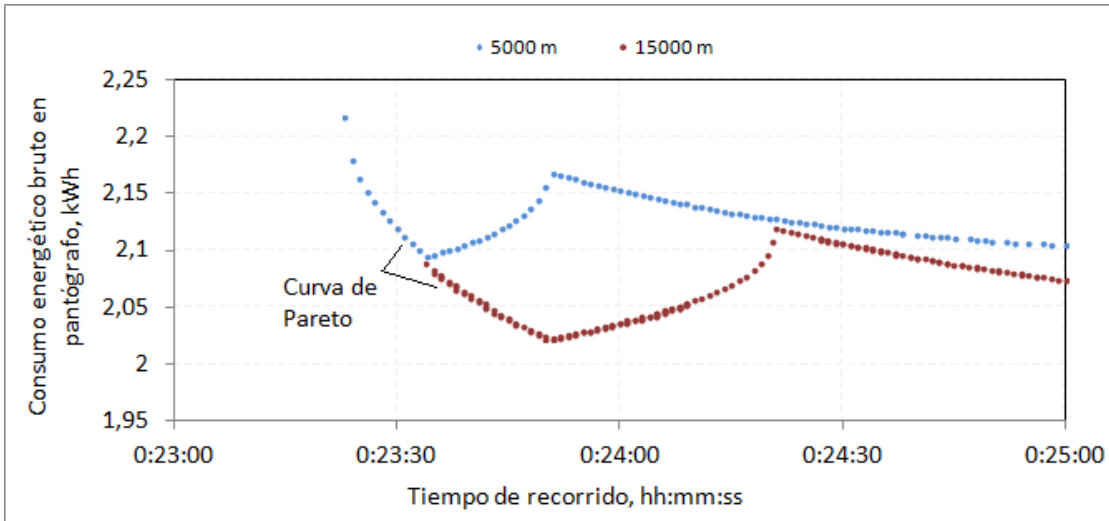


Figura 2-67. Tiempo de recorrido y consumo energético bruto en pantógrafo de conducciones simuladas en una línea horizontal de 100 km con diferentes longitudes de deriva.

Si se selecciona únicamente la curva de Pareto para cada una de las pruebas anteriores y se repite la misma con distintas velocidades de regulación se obtiene la Figura 2-68, que muestra las curvas de Pareto de las conducciones formadas por un tramo de regulación y una deriva final de longitud variable. En cada una de estas curvas, la conducción de máximo consumo es equivalente a la marcha de regulación sin el tramo de deriva final.

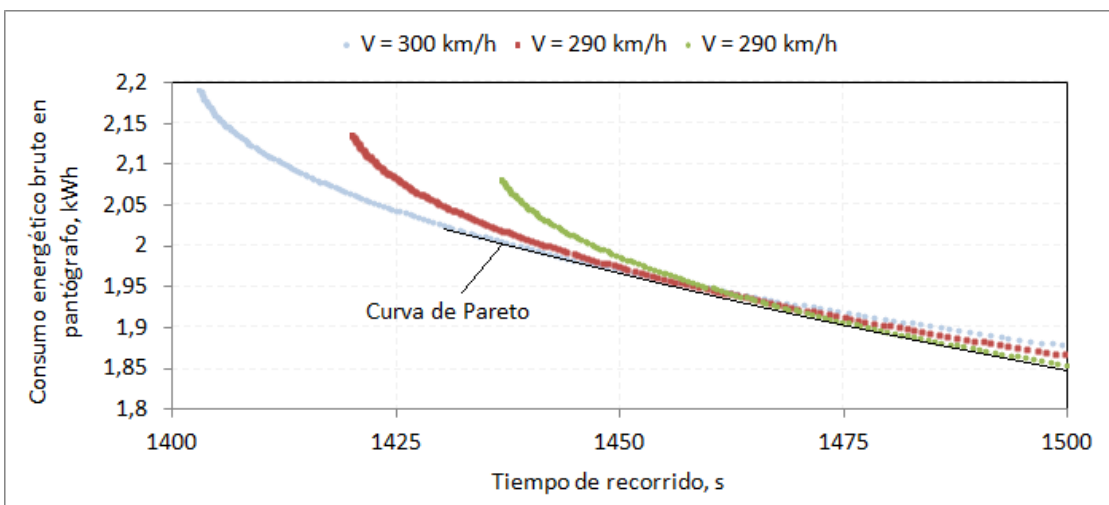


Figura 2-68. Barrido de deriva con diferentes velocidades de regulación, tiempo de recorrido y consumo energético bruto en pantógrafo de conducciones simuladas en una línea horizontal de 100 km.

A la vista de estas pruebas, si se selecciona, para cada tiempo de recorrido, la conducción con menor consumo energético, se obtiene la curva de Pareto global para las conducciones formadas por un tramo de regulación y una deriva final en un trayecto horizontal de 100 km.

El análisis anterior se ha realizado para una línea horizontal con fines explicativos. En el siguiente conjunto de simulaciones se ha realizado el mismo estudio que el realizado anteriormente para la línea Madrid-Zaragoza, con conducciones consistentes en un tramo de regulación de velocidad sin freno y una deriva final de hasta 40 km. La

Figura 2-69 muestra las curvas de Pareto tiempo de recorrido – consumo energético bruto en pantógrafo. Se observa el mismo comportamiento que en el caso de la línea horizontal; para un tiempo de recorrido dado, existe una velocidad de regulación y un punto de comienzo de deriva final óptimos.

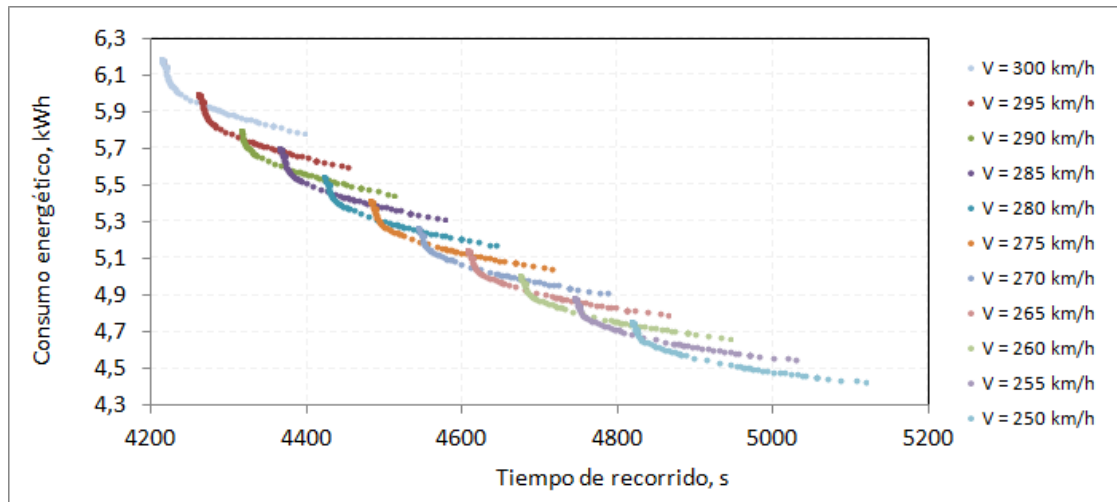


Figura 2-69. Tiempo de recorrido y consumo energético bruto en pantógrafo de conducciones simuladas en el trayecto Madrid-Zaragoza con diferentes velocidades de regulación.

La Figura 2-70 muestra las curvas de Pareto tiempo de recorrido - consumo energético bruto en pantógrafo para conducciones cuya regulación de velocidad se realiza frenando y sin frenar. Cuanto menor es la velocidad de regulación, existirán más tramos de pendiente cuyas velocidades de equilibrio la superen (Figura 2-71), y por lo tanto más tiempo se circulará en deriva a velocidad superior a la de regulación en las conducciones basadas en regulación sin freno. La velocidad de equilibrio es la que alcanza un tren en deriva cuando el sumatorio de las fuerzas externas que actúan sobre el mismo es nulo. Esto sucederá en tramos en pendiente, donde la fuerza debida a la pendiente contrarrestará la resistencia debida al radio de curvatura y la resistencia al avance (Jong 2003). La Figura 2-71 muestra las velocidades de equilibrio, obtenidas mediante simulación, del Talgo-Bombardier S-102.

Como muestra la Figura 2-70, a velocidades altas (290 km/h) no se producen casi tramos de deriva durante la regulación de velocidad sin freno, ya que solo las velocidades de equilibrio correspondientes a pendientes pronunciadas superarán dicha velocidad, y por lo tanto ambas estrategias producen resultados similares. En cambio, a velocidades menores (250 km/h) se posibilita el aumento de tramos de deriva durante la regulación sin freno, siendo esta estrategia más eficiente, además de más rápida, para los mismos parámetros de sus consignas.

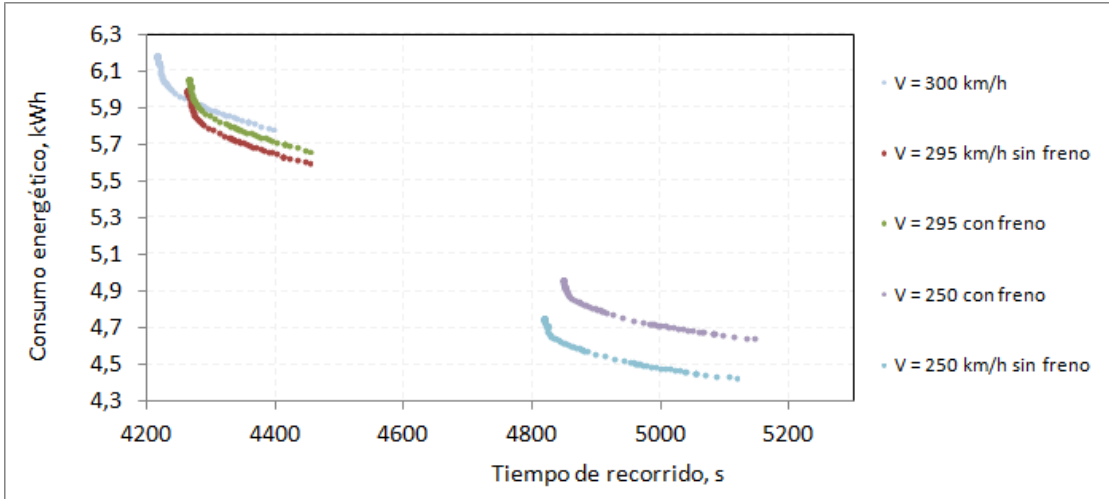


Figura 2-70. Tiempo de recorrido y consumo energético bruto en pantógrafo para conducciones basadas en regulación pura y sin freno en el trayecto Madrid-Zaragoza con diferentes velocidades de regulación.

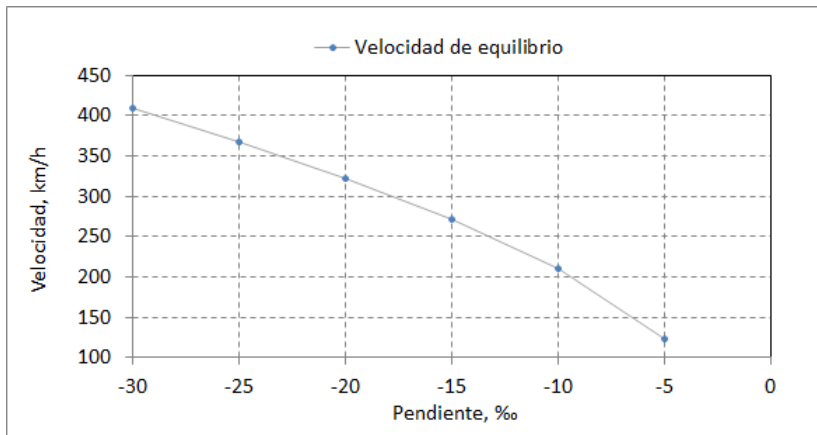


Figura 2-71. Velocidades de equilibrio del Talgo-Bombardier S-102.

En los trayectos que gocen de amplios márgenes de tiempo es preferible adoptar estrategias de regulación de velocidad sin freno. En cambio, en trayectos donde sea necesario aplicar conducciones cercanas a la marcha tendida, las estrategias de regulación sin freno no ofrecerán ventajas significativas. Las líneas de *Alta Velocidad* españolas aún están lejos de la saturación y los servicios comerciales gozan de márgenes de tiempo suficientes como para suponer que el modelo de conducción priorizará la estrategias de regulación de velocidad sin freno frente a la regulación pura.

Hasta ahora se han analizado conducciones consistentes en dos consignas, una primera de regulación de velocidad y una segunda de deriva final. Para evaluar la influencia del número de consignas en el consumo energético, se procederá a diseñar la conducción manual óptima para el trayecto Madrid-Guadalajara variando el número de las mismas. Para ello se empleará el *Algoritmo Evolutivo* que se describirá en la sección 2.3. La Figura 2-72 muestra los resultados obtenidos, donde la conducción óptima para una única consigna corresponde a una conducción basada en un único tramo de velocidad de regulación sin freno. Para el resto de casos, la conducción estará formada por un tramo de deriva final y $n - 1$ tramos de regulación de

velocidad sin freno. Cada columna corresponde a la media de diez procesos de optimización. Como era de esperar, a medida que aumenta el número de consignas disminuye el consumo de la conducción óptima, aunque cada vez el ahorro marginal de aumentar una consigna más será menor. Este hecho, unido a que cuanto mayor sea el número de consignas mayor dificultad tendrá el maquinista para implementar la conducción, hará que se deba llegar a un compromiso en el número de consignas, que en general podrá depender de la longitud del trayecto en el que se esté diseñando la conducción. Los mismos resultados se muestran numéricamente en la Tabla 2-11.

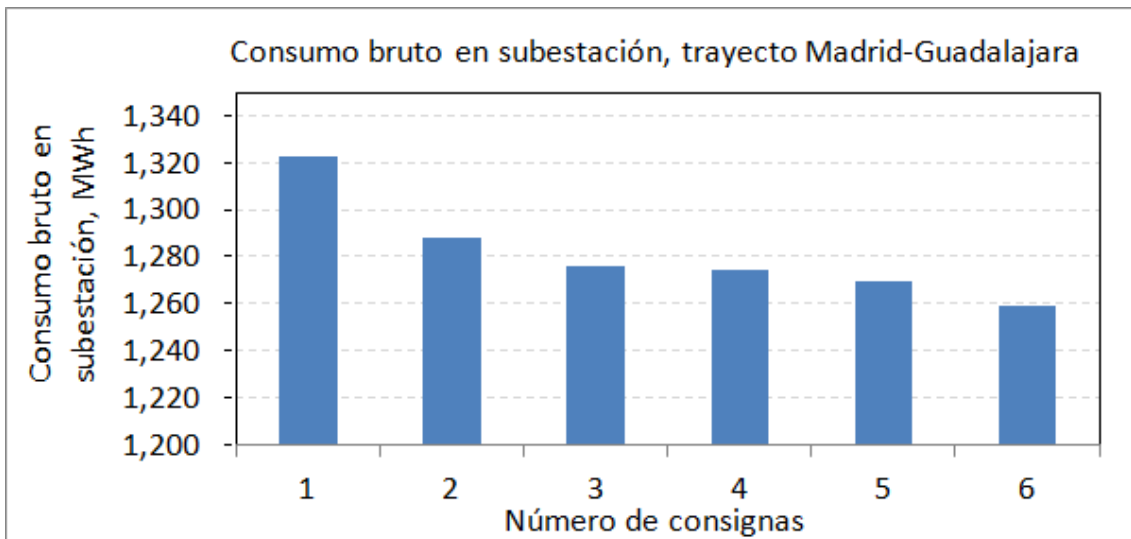


Figura 2-72. Consumo bruto en subestación de la conducción óptima en el trayecto Madrid-Guadalajara según el número de consignas.

Nº de consignas	Tiempo hh:mm:ss	Consumo bruto en subestación MWh	Ahorro respecto a conducción tendida (%)
Tendida	0:21:30	1.654	-
1	0:23:00	1.323	22.02 %
2	0:23:00	1.288	22.09 %
3	0:23:00	1.275	22.82 %
4	0:23:00	1.276	22.93 %
5	0:23:00	1.269	23.24 %
6	0:23:00	1.259	23.88 %

Tabla 2-11. Consumo bruto en subestación de la conducción óptima en el trayecto Madrid-Guadalajara según el número de consignas.

Tras el análisis de la conducción manual detallado anteriormente se decide adoptar un modelo de conducción manual con la siguiente estructura:

- Estará formada por $N + 1$ consignas, las N primeras consistirán en estrategias de regulación de velocidad sin freno, y la última en una deriva final.
- El número N de tramos de regulación de velocidad sin freno se elegirá atendiendo principalmente a la longitud del trayecto sobre el que se diseña la conducción, con el fin de no sobresaturar al maquinista con excesivas consignas.

El modelo de conducción propuesto y la forma de transición entre consignas definida permitirá la aplicación de todas las estrategias de conducción eficientes encontradas en la literatura, ya que para definir una deriva prolongada durante en medio de un trayecto bastará definir un tramo de regulación a velocidad reducida, y para definir un tramo de deriva-remotor bastará definir tramos alternativos de velocidades de regulación.

2.3. ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

Para encontrar la conducción manual eficiente óptima a lo largo de un trayecto de *Alta Velocidad* se aplicará un *Algoritmo Evolutivo* inspirado en los *Algoritmos Genéticos*, que son algoritmos de optimización heurísticos así llamados por su inspiración en la evolución biológica, donde las especies mejor adaptadas son las que sobreviven. Los *Algoritmos Genéticos* son técnicas de búsqueda que llegan a soluciones subóptimas en periodos de tiempo breves, posibilitando así resolver sistemas multidimensionales y complejos.

La primera necesidad para la aplicación del *Algoritmo Evolutivo* es la adecuada codificación de los parámetros a optimizar, que en este caso serán las consignas de conducción manual (punto kilométrico inicial, punto kilométrico final y velocidad de consigna).

El *Algoritmo Evolutivo* comenzará con la generación aleatoria de una población inicial de conducciones, a partir de la que se establecerá un proceso iterativo, donde en cada iteración se realizará una serie de operaciones de selección y recombinación (hijos, cruces y mutaciones) que darán lugar a nuevas conducciones, que posteriormente serán simuladas y evaluadas mediante una función objetivo o fitness, encargada de cuantificar la bondad de cada una de ellas.

Cada conducción será codificada mediante una matriz de consignas M_c (ecuación 2.60) que indicará los puntos de cambio entre consignas y las velocidades de regulación sin freno de cada una de ellas (Figura 2-73).

$$M_c = \begin{bmatrix} x_1 & v_1 \\ x_2 & v_2 \\ \dots & \dots \\ x_{n-1} & v_{n-1} \\ x_n & v_n \end{bmatrix} \quad 2.60$$

Donde x_i se refiere a la posición de cambio entre la consigna i y la $i + 1$ y v_i indica la velocidad de regulación sin freno de la consigna i . El número de puntos de cambio de consignas de la conducción eficiente n debe establecerlo el operador como un compromiso entre el ahorro energético adicional al aumentar una consigna y la dificultad adicional que supone para el maquinista añadir una nueva consigna a la conducción.

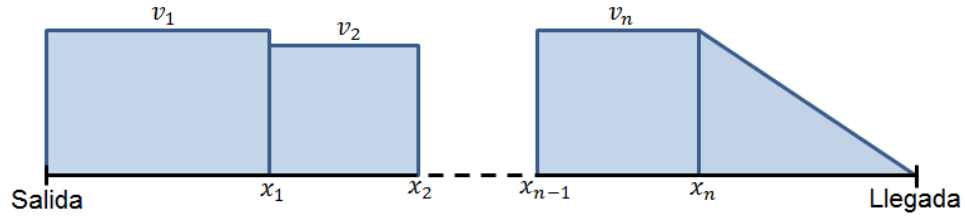


Figura 2-73. Estructura de conducción manual definida por la matriz de consignas M_c .

Por otro lado, la función objetivo (Fitness Function, FF) será la función con la que se evaluará cada conducción manual una vez simulada. Será una función mono objetivo, que consistirá en la minimización del consumo, a la que se añadirá una restricción asociada al tiempo de recorrido con el objetivo de que éste sea igual al tiempo de recorrido objetivo.

La ecuación 2.61 muestra la función objetivo empleada, que estará definida a intervalos según el tiempo de recorrido de la conducción sea superior o inferior al tiempo de recorrido objetivo.

$$FF(T_r, E) = \begin{cases} w_e \cdot \frac{E}{E_{tendida}} + w_t \cdot \frac{T_r}{T_{obj}} & \text{si } T_r > T_{obj} \\ w_e \cdot \frac{E}{E_{tendida}} + w_t \cdot \frac{T_{obj}}{T_r} & \text{si } T_r \leq T_{obj} \end{cases} \quad 2.61$$

Siendo w_e y w_{tr} los pesos asociados al consumo energético y al tiempo de recorrido respectivamente, E el consumo energético simulado de la conducción, $E_{tendida}$ el consumo energético asociado a la conducción a marcha tendida, T_r el tiempo de recorrido simulado de la conducción y T_{obj} el tiempo de recorrido objetivo.

La única diferencia en cada intervalo de definición de la función objetivo se encuentra en la parte que evalúa el tiempo de recorrido, consiguiendo de esta manera penalizar las conducciones cuyo tiempo de recorrido difiera del tiempo de recorrido objetivo, penalización que será mayor cuanto mayor sea dicha diferencia.

Para una conducción concreta, en general la parte energética de la función objetivo será menor cuanto mayor sea su tiempo de recorrido. En cambio, la parte de tiempo de recorrido de la función objetivo será menor cuanto más parecido sea el tiempo de recorrido al tiempo de recorrido objetivo (Figura 2-74).

De una adecuada selección de los pesos x_c y x_t dependerá el correcto funcionamiento de la función objetivo; valores de x_c excesivamente mayores que x_t primarán el consumo energético por encima del tiempo de recorrido, pudiendo dar lugar a soluciones cuyo tiempo de recorrido exceda el tiempo de recorrido objetivo, lo que es inadmisibles en el diseño que se pretende.

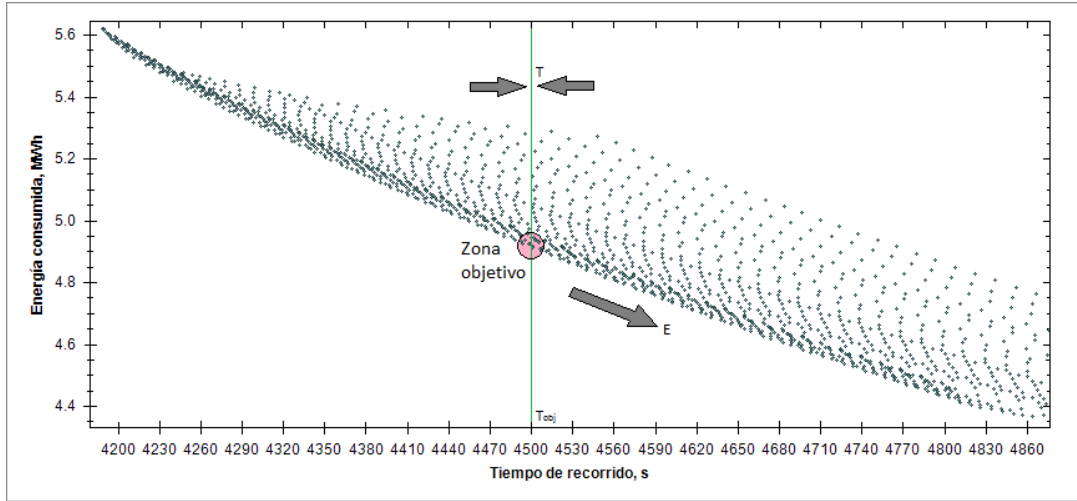


Figura 2-74. Funcionamiento de la función objetivo/Fitness.

Los pasos seguidos en cada generación del *Algoritmo Evolutivo* se listan en el diagrama de flujo de la Figura 2-75.

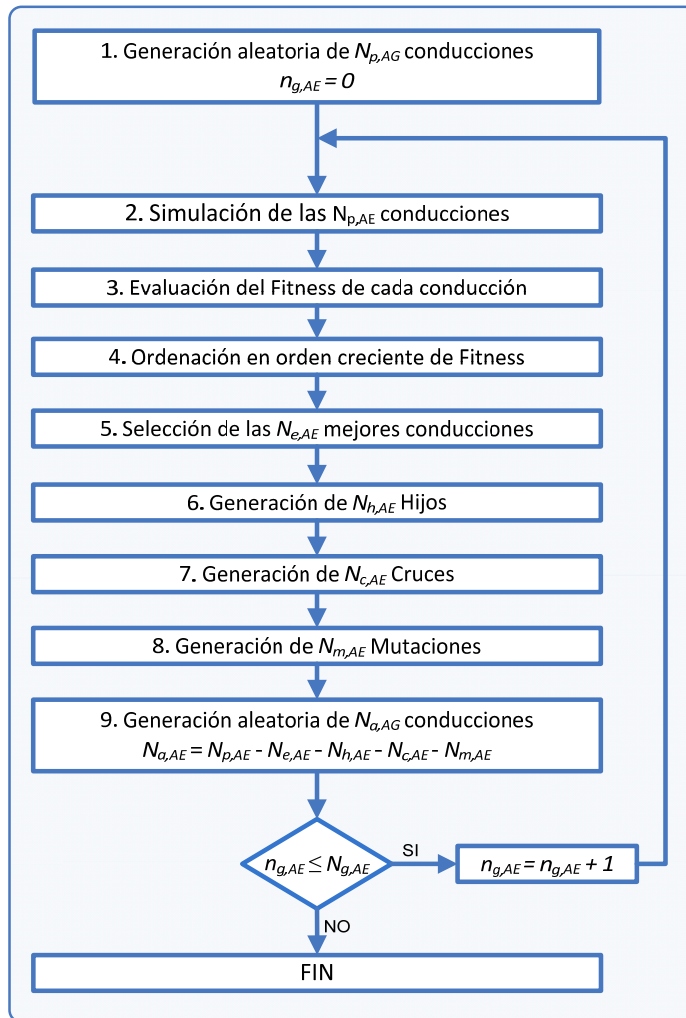


Figura 2-75. Diagrama de flujo del *Algoritmo Evolutivo*.

A continuación se describen los pasos del *Algoritmo Evolutivo*:

1. Generación aleatoria de conducciones.

El primer paso del *Algoritmo Evolutivo* es la generación de la población inicial, que estará formada por un conjunto de $N_{p,AE}$ conducciones generadas de manera aleatoria. Generar una conducción es equivalente a asignar un valor a cada elemento de su matriz de consignas M_c . Para ello se siguen los siguientes pasos con cada conducción:

- Generación aleatoria de N valores de velocidad de regulación v_i comprendidos en el intervalo $[V_{reg,min}, V_{reg,max}]$.
- Generación aleatoria del punto de comienzo de la consigna de deriva final (x_n), comprendido en el intervalo $[x_{df,min}, x_{df,max}]$, cuyos valores dependerán del perfil del trayecto y del tiempo de holgura teórico del mismo, ya que se pueden dar situaciones en que el tiempo de holgura teórico del trayecto sea tan reducido que no sea posible aplicar la consigna de deriva final.
- Generación aleatoria de las $N - 1$ posiciones de cambio de consigna, comprendidas en el intervalo $[X_{inicio}, x_n]$.
- Ordenación crecientemente de las $N - 1$ posiciones de cambio de consigna generadas en el paso anterior, quedando finalmente definida la conducción.

A la matriz de consignas así obtenida se le predice el tiempo de recorrido con el fin de corregir las velocidades de regulación para que dicho tiempo de recorrido sea similar al tiempo de recorrido objetivo, que es la zona donde interesa buscar conducciones. Por ejemplo, para el trayecto Madrid-Guadalajara y un tiempo objetivo de 23 minutos, sin aplicar la corrección de las velocidades de regulación se obtiene una desviación típica de los tiempos de recorrido para los parámetros normalmente empleados en el algoritmo de 88 s. En cambio, aplicando la función de corrección de las velocidades se consigue reducir la desviación típica hasta los 44,85 s. Este proceso se realiza para disminuir el número de generaciones necesarias para llegar a la conducción óptima. La función de estimación del tiempo de recorrido será diferente para cada trayecto, ya que depende sensiblemente de los límites de velocidad y del perfil de la línea.

Tras el paso anterior se comprueba que todas las velocidades de regulación corregidas siguen perteneciendo al intervalo $[V_{reg,min}, V_{reg,max}]$, y en caso contrario se ajustan al valor extremo la que aplique.

2. Simulación de cada conducción perteneciente a la población

En este paso se simula cada una de las conducciones de la población, obteniendo para cada una de ellas su tiempo de recorrido y consumo energético asociado.

3. Evaluación de cada conducción mediante la función objetivo

En este paso se evalúa cada conducción de la población mediante la función objetivo, introduciendo en la misma los valores de tiempo de recorrido y consumo energético de cada conducción y guardando el valor de la función fitness de cada una de ellas.

4. Ordenación de las conducciones en orden creciente de su valor fitness

En este paso se ordenan las conducciones de forma creciente de su valor fitness.

5. Selección del grupo de elite

En este paso se seleccionan las $N_{e,AE}$ primeras conducciones fruto de la ordenación anterior, que formarán el grupo de elite de la generación actual y estarán presentes en la siguiente generación.

6. Generación de $N_{h,AE}$ hijos.

En este paso se generan conducciones similares a las presentes en el grupo de elite. Para generar un hijo se parte de una conducción seleccionada de forma aleatoria. A continuación, se selecciona aleatoriamente un único elemento de su matriz de consignas y se modifica.

Si el valor modificado es una velocidad de regulación, se comprueba que pertenece al intervalo $[V_{reg,min}, V_{reg,max}]$, y si se trata de una posición de cambio de consigna, el valor de la nueva posición de cambio pertenecerá al intervalo entre las posiciones de cambio de las dos posiciones de cambio de las consignas adyacentes. Con esta función se consigue buscar localmente en el espacio de soluciones para evaluar posibles mejoras, ya que las conducciones hijas serán similares a las conducciones de las que provienen.

7. Generación de $N_{c,AE}$ cruces.

En este paso se generan $N_{c,AE}$ cruces entre pares de conducciones. Cada cruce de dos conducciones dará lugar a una nueva conducción. Para cruzar dos conducciones entre sí, en primer lugar se seleccionan dos conducciones aleatoriamente de la población de origen, conducciones que estarán definidas por sus matrices de consignas M_{cA} y M_{cB} respectivamente. A continuación se generan dos números aleatorios naturales p y q en el intervalo $[1, N]$, tales que $p \leq q$. La conducción fruto del cruce de la conducción A y la conducción B, que se definirá con la matriz de consignas $M_{c,Cruce}$, estará formada por las p primeras consignas de la conducción A, seguido de las consignas $[p + 1, q]$ de la conducción B, y finalmente las consignas $[q + 1, N]$ de la conducción A, respetando los puntos de cambio de consigna correspondientes. La Figura 2-76 muestra un ejemplo de cruce entre dos conducciones formadas por cinco consignas, y la expresión general de la matriz de consignas de la conducción de cruce $M_{c,Cruce}$ se muestra en la ecuación 2.62.

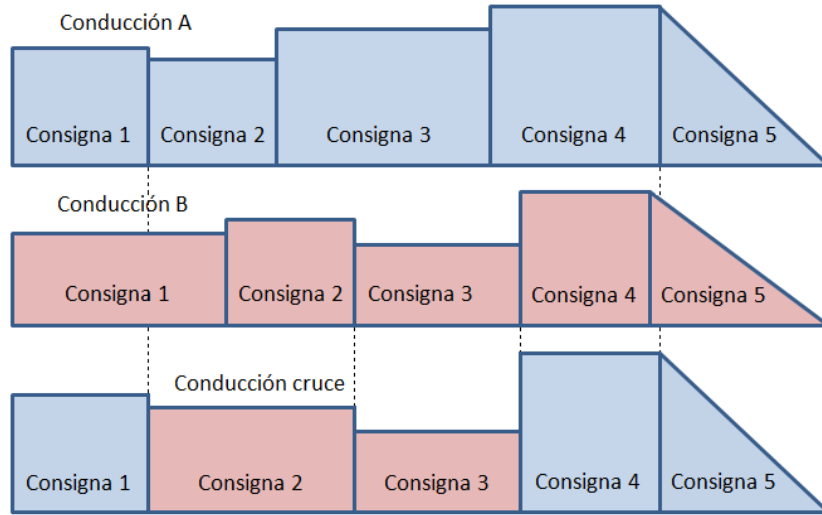


Figura 2-76. Cruce entre dos conducciones formadas por cinco consignas.

$$M_{c_A} = \begin{bmatrix} x_{1,A} & v_{1,A} \\ \dots & \dots \\ x_{p,A} & v_{p,A} \\ x_{p+1,A} & v_{p+1,A} \\ \dots & \dots \\ x_{q,A} & v_{q,A} \\ x_{q+1,A} & v_{q+1,A} \\ \dots & \dots \\ x_{n,A} & v_{n,A} \end{bmatrix} \quad M_{c_B} = \begin{bmatrix} x_{1,B} & v_{1,B} \\ \dots & \dots \\ x_{p,B} & v_{p,B} \\ x_{p+1,B} & v_{p+1,B} \\ \dots & \dots \\ x_{q,B} & v_{q,B} \\ x_{q+1,B} & v_{q+1,B} \\ \dots & \dots \\ x_{n,B} & v_{n,B} \end{bmatrix} \quad M_{c_{Cruce}} = \begin{bmatrix} x_{1,A} & v_{1,A} \\ \dots & \dots \\ x_{p,A} & v_{p,A} \\ x_{p+1,B} & v_{p+1,B} \\ \dots & \dots \\ x_{q,B} & v_{q,B} \\ x_{q+1,A} & v_{q+1,B} \\ \dots & \dots \\ x_{n,A} & v_{n,A} \end{bmatrix} \quad 2.62$$

Las conducciones cruzadas suelen tener consumos energéticos y tiempos de recorrido muy dispares respecto de las conducciones de las que provienen, de manera que el cruce es útil para abrir el espacio de búsqueda de soluciones eficientes. La Figura 2-77 muestra un ejemplo de un conjunto de conducciones en el trayecto Madrid-Guadalajara, todas ellas generadas por la función de cruce de las mismas dos conducciones. Como se puede observar, la dispersión en tiempos de recorrido y consumos energéticos es considerable. La función de cruce así descrita supone una aportación original en la tesis.

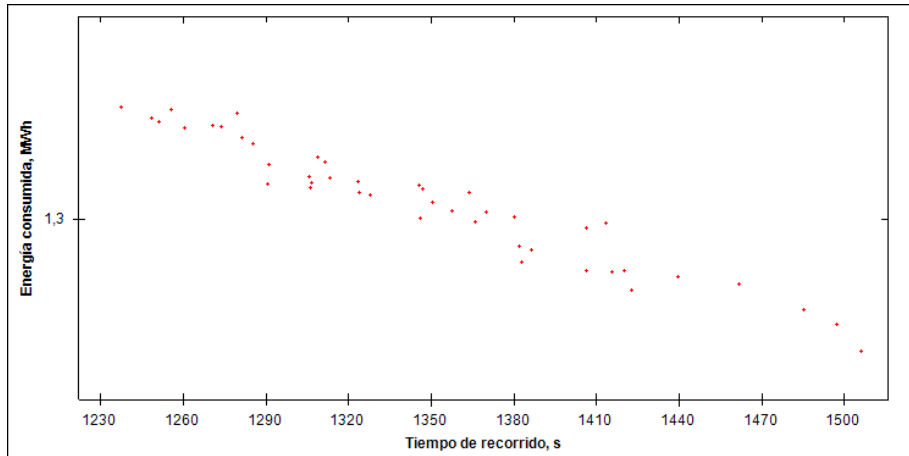


Figura 2-77. Conjunto de conducciones cruzadas entre sí en el trayecto Madrid-Guadalajara.

8. Generación de $N_{m,AE}$ mutaciones.

En este paso se generan $N_{m,AG}$ nuevas conducciones. En primer lugar se selecciona aleatoriamente una conducción. A continuación se generan dos números aleatorios naturales p y q en el intervalo $[1, N]$ tales que $p \neq q$, y posteriormente se intercambian las consignas p y q entre sí, modificando las posiciones de cambio de consigna entre p y q . La Figura 2-78 muestra un ejemplo de mutación para una conducción formada por cinco consignas.

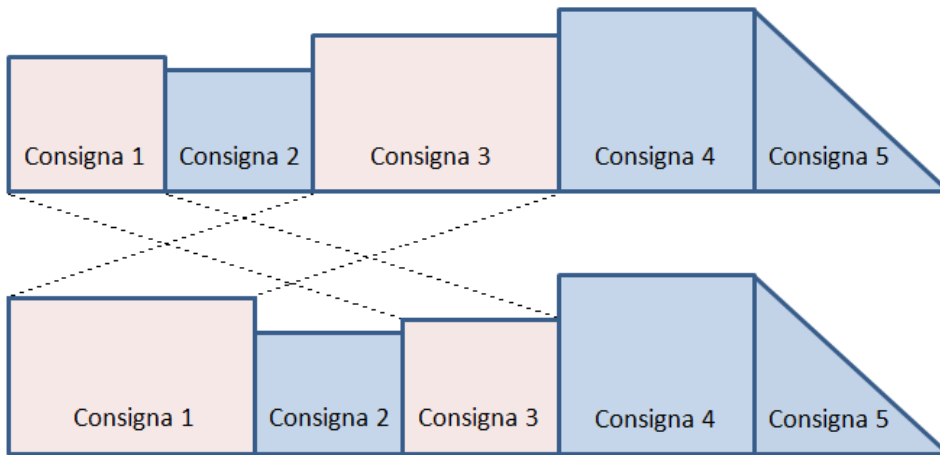


Figura 2-78. Mutación de las consignas 1ª y 3ª de una conducción formada por 5 consignas.

Las conducciones mutadas suelen tener tiempos de recorrido y consumos energéticos similares a las conducciones de las que provienen, de manera que la mutación es adecuada para la exploración local. Por este motivo, las conducciones que se mutarán provendrán únicamente del grupo de elite de la población. La función de mutación así descrita supone una aportación original en la tesis.

La Figura 2-79 muestra un ejemplo de un conjunto de conducciones en el trayecto Madrid-Guadalajara, todas ellas generadas a partir de una misma conducción que ha sido mutada en repetidas ocasiones con la función de mutación descrita anteriormente. Como se puede observar, la dispersión en tiempos de recorrido y consumos energéticos es pequeña.

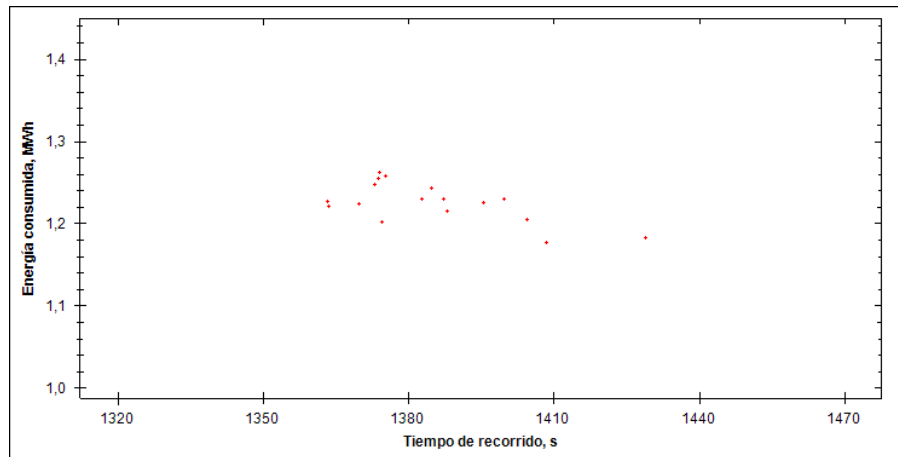


Figura 2-79. Conjunto de conducciones mutadas entre sí en el trayecto Madrid-Guadalajara.

9. Generación aleatoria de $N_{a,AE}$ conducciones

Este paso es idéntico al paso 1, y en él se generan $N_{a,AE}$ conducciones aleatorias hasta completar el tamaño de la población, donde $N_{a,AE}$ cumple la ecuación 2.63.

$$N_{a,AE} = N_{p,AE} - N_{e,AE} - N_{h,AE} - N_{c,AE} - N_{m,AE} \quad 2.63$$

Este proceso iterativo se repite generación tras generación hasta que se alcanza el número máximo de generaciones, dando por concluida la optimización. La solución será el primer elemento de la población de la última generación, que será la conducción con el mínimo valor de fitness obtenido durante todo el proceso, y cuya matriz de consignas representará la conducción manual óptima en el trayecto considerado.

La Figura 2-80 muestra el perfil de la conducción optimizada al aplicar el *Algoritmo Evolutivo* detallado anteriormente en el tramo Madrid-Guadalajara con un tiempo objetivo $T_{obj} = 0:23:00$, y los siguientes parámetros:

$$N_{p,AE} = 75$$

$$N_{e,AE} = 5$$

$$N_{h,AE} = 10$$

$$N_{c,AE} = 10$$

$$N_{m,AE} = 10$$

$$N_{a,AE} = 40$$

$$N_{g,AE} = 20$$

La conducción eficiente obtenida produjo un ahorro del 17,81% respecto a la conducción a marcha tendida, de 20 minutos de duración. El Algoritmo de

optimización tardó 168s en ejecutarse en un ordenador con un procesador Intel Core i7-2600 CPU @ 3,4 GHz.

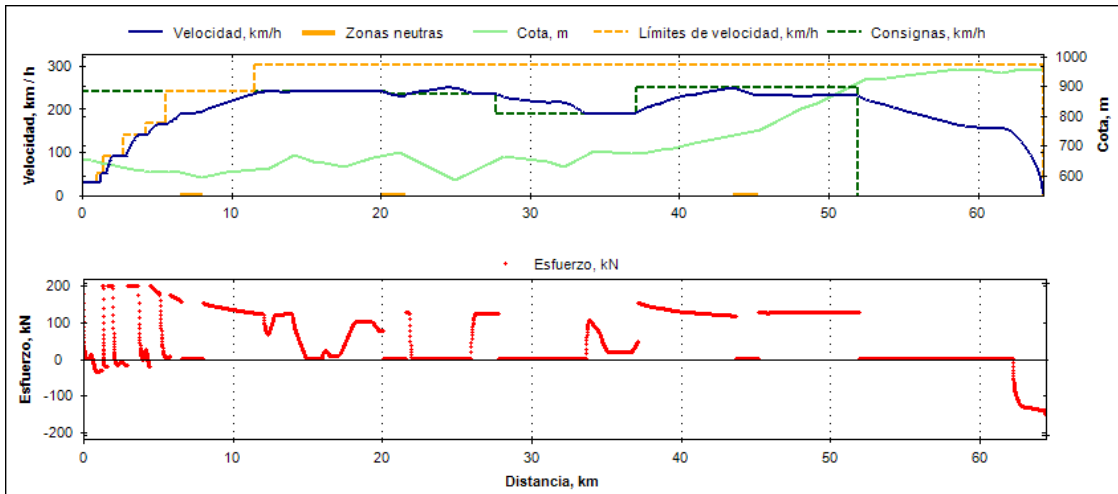


Figura 2-80. Conducción óptima con 4 consignas en el trayecto Madrid-Guadalajara para un tiempo objetivo de 0:23:00.

La Figura 2-81 muestra la evolución del valor fitness de la mejor conducción y de la media del fitness del grupo de elite en cada una de las 20 generaciones. A medida que éstas avanzan, cada vez hay menos diferencia entre la media del fitness y el fitness del óptimo, ya que cada vez están más concentradas las conducciones alrededor de la óptima.

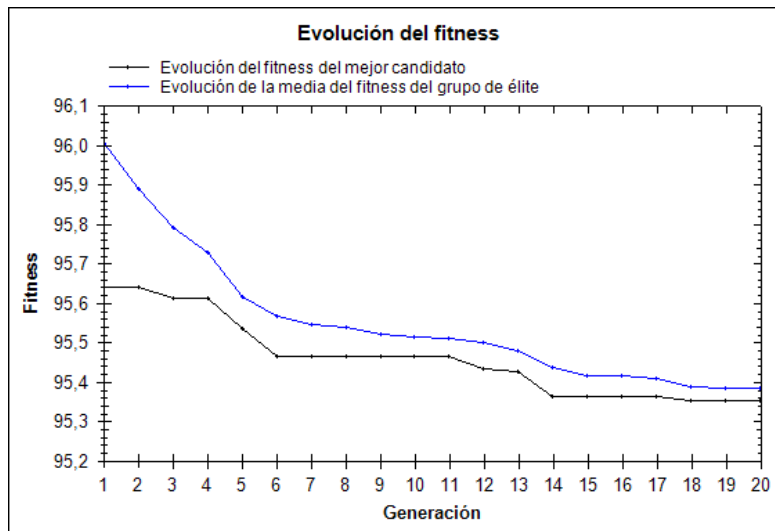


Figura 2-81. Evolución del fitness del mejor candidato y de la media del grupo de elite en el trayecto Madrid-Guadalajara para un tiempo objetivo de 0:23:00.

La Figura 2-82 muestra la evolución del tiempo de recorrido y del consumo energético de la mejor conducción presente en cada generación.

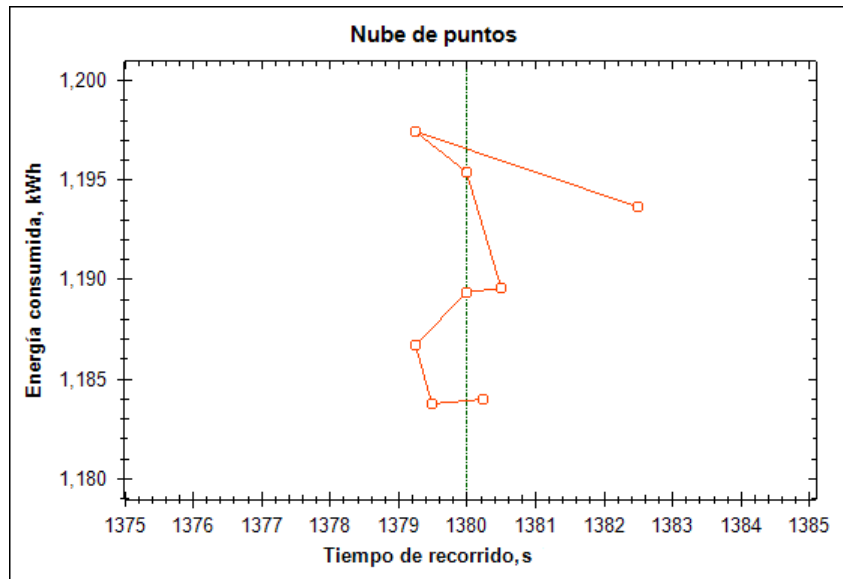


Figura 2-82. Evolución del tiempo de recorrido y del consumo energético de la conducción óptima en el trayecto Madrid-Guadalajara para un tiempo objetivo de 0:23:00.

2.4. CASO EJEMPLO

En esta sección se mostrará un caso ejemplo real de diseño de conducciones manuales eficientes que posteriormente fueron ensayadas y registradas en servicios reales de *Alta Velocidad*. El recorrido elegido fue el Madrid-Guadalajara-Calatayud-Zaragoza, tanto en sentido directo como inverso (Figura 2-83). Ambos servicios están actualmente en operación y son realizados con el tren S-102 Talgo-Bombardier. Por tanto, cada servicio está formado por tres trayectos, cada uno de ellos caracterizado por su tiempo de recorrido comercial, que se extrajo del horario comercial en el momento de realizar las pruebas.

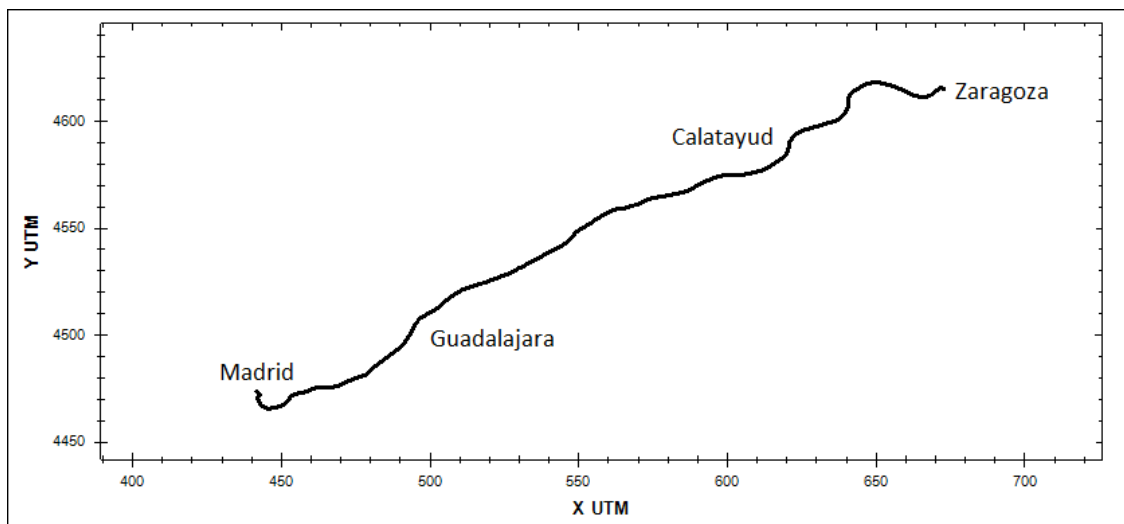


Figura 2-83. Trazado en planta de la línea de *Alta Velocidad* Madrid-Zaragoza.

La Tabla 2-12 muestra, para diferentes trayectos a lo largo de la línea Madrid-Zaragoza, el tiempo de recorrido a marcha tendida, el tiempo comercial y el tiempo de

holgura teórico, tanto en 2009 (año en el que se diseñaron las conducciones), como en 2012.

A medida que madura la explotación de una red ferroviaria de *Alta Velocidad*, la tendencia natural es ir reduciendo el tiempo de recorrido comercial de los servicios y por lo tanto el tiempo de holgura de cada trayecto. Esta tendencia se aprecia en la Tabla 2-12 y la Figura 2-84, donde muchos de los tiempos de holgura teóricos sufren disminuciones entre 2009 y 2012.

Servicio comercial	Tiempo Marcha tendida hh:mm:ss	Tiempo comercial hh:mm:ss	Margen teórico hh:mm:ss	Margen teórico %	Tiempo comercial hh:mm:ss	Margen teórico hh:mm:ss	Margen teórico %	Disminución de tiempo 2009/2012 %	Disminución de margen 2009/2012 %
Servicio comercial	-	2009	2009	2009	2012	2012	2012	-	-
Madrid-Guadalajara (3393)	0:19:45	0:23:00	0:03:15	14,13%	0:23:00	0:03:15	14,13%	0,00%	0,00%
Madrid-Calatayud (3073)	0:51:11	0:57:00	0:05:49	10,20%	0:57:00	0:05:49	10,20%	0,00%	0,00%
Madrid-Zaragoza (3103)	1:09:44	1:18:00	0:08:16	10,60%	1:15:00	0:05:16	7,02%	3,85%	36,29%
Guadalajara-Calatayud (3393)	0:34:51	0:39:00	0:04:09	10,64%	0:38:00	0:03:09	8,29%	2,56%	24,10%
Guadalajara-Zaragoza (3093)	0:53:24	1:00:00	0:06:36	11,00%	0:57:00	0:03:36	6,32%	5,00%	45,45%
Calatayud-Zaragoza (3393)	0:21:54	0:26:00	0:04:06	15,77%	0:25:00	0:03:06	12,40%	3,85%	24,39%
Zaragoza-Calatayud (3272)	0:22:01	0:24:00	0:01:59	8,26%	0:24:00	0:01:59	8,26%	0,00%	0,00%
Zaragoza-Guadalajara (3062)	0:53:34	0:58:00	0:04:26	7,64%	0:56:00	0:02:26	4,35%	3,45%	45,11%
Calatayud-Guadalajara (3272)	0:35:08	0:37:00	0:01:52	5,05%	0:37:00	0:01:52	5,05%	0,00%	0,00%
Zaragoza-Madrid (3462)	1:09:44	1:23:00	0:13:16	15,98%	1:19:00	0:09:16	11,73%	4,82%	30,15%
Calatayud-Madrid (3082)	0:51:18	1:03:00	0:11:42	18,57%	1:02:00	0:10:42	17,26%	1,59%	8,55%
Guadalajara-Madrid (3272)	0:19:17	0:31:00	0:11:43	37,80%	0:31:00	0:11:43	37,80%	0,00%	0,00%

Tabla 2-12. Características de trayectos comerciales en la línea de *Alta Velocidad* Madrid-Zaragoza.

Fuente: Renfe.

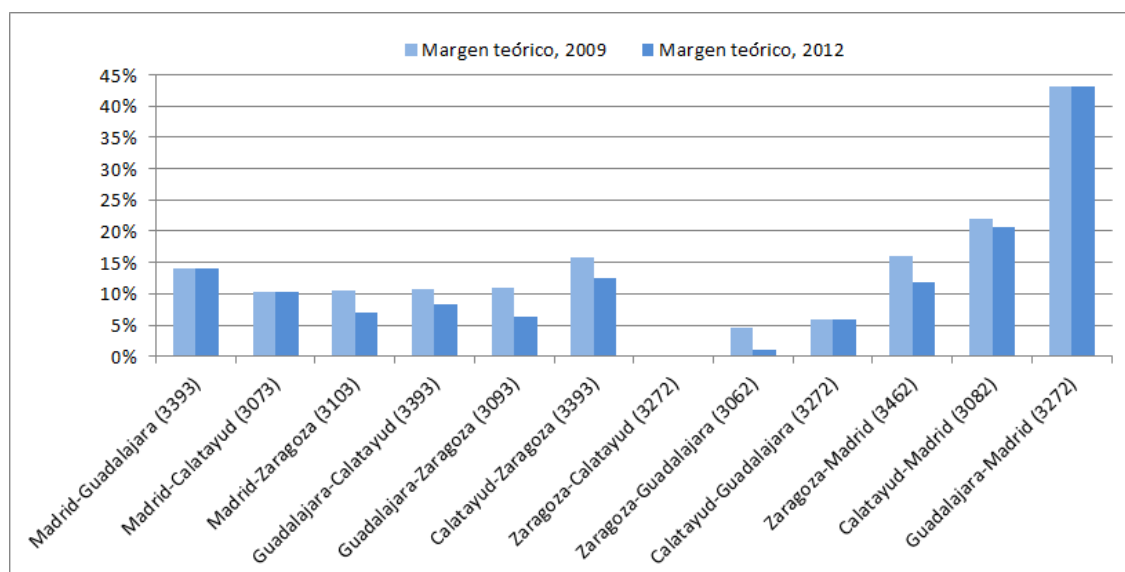


Figura 2-84. Tiempos de holgura teóricos de trayectos comerciales entre Madrid y Zaragoza, años 2009 y 2012. Fuente: Renfe.

Otra característica de los horarios de servicios de *Alta Velocidad* es la tendencia a acumular mayores tiempos de holgura en los trayectos finales de los servicios, así como en aquellos con destino en núcleos de población grandes, como ocurre en este caso con Madrid y Zaragoza respectivamente. Los horarios son elaborados de esta manera con el fin de incrementar la probabilidad de llegada puntual a estaciones con gran tráfico a costa de reducirlo en otras estaciones con menos tráfico.

Esto se puede observar en el servicio 3272, donde el trayecto Calatayud-Guadalajara tiene tiempo de holgura teórico de apenas 1:52, un 5,05% del tiempo de recorrido comercial en una distancia de 156,900 km. Sin embargo, en el mismo servicio, el trayecto Guadalajara-Madrid tiene un tiempo de holgura teórico de 11:43, un 37,80% del tiempo de recorrido comercial para una distancia de 64,400 km (año 2009). Esto implica que el potencial de ahorro energético del trayecto Zaragoza-Calatayud sea menor que el del trayecto Guadalajara-Madrid, como se mostrará más adelante.

La Tabla 2-13 muestra un resumen con las principales características de cada servicio en el momento en que se realizaron los diseños de conducciones óptimas.

1	2	3	4	5	6	7	8
Servicio	Trayecto	Dist. km	Tiempo tendida hh:mm:ss	Tiempo comercial hh:mm:ss	Margen teórico hh:mm:ss	Margen teórico %	Ratio margen teórico/ distancia s/km
Madrid Zaragoza	Madrid-Guadalajara	64,4	0:19:45	0:23:00	0:03:15	14,13%	3,03
	Guadalajara-Calatayud	156,9	0:34:51	0:39:00	0:04:09	10,64%	1,59
	Calatayud-Zaragoza	85,4	0:21:54	0:26:00	0:04:06	15,77%	2,88
Zaragoza Madrid	Zaragoza-Calatayud	85,4	0:22:01	0:24:00	0:01:59	8,26%	1,39
	Calatayud-Guadalajara	156,9	0:35:08	0:37:00	0:01:52	5,05%	0,71
	Guadalajara-Madrid	64,4	0:19:17	0:31:00	0:11:43	37,80%	10,92

Tabla 2-13. Características operativas de los trayectos de diseño, año 2009.

El procedimiento empleado para diseñar la conducción óptima en cada trayecto fue la aplicación del *Algoritmo Evolutivo* basado en simulación detallado en la sección 2.3. Cada uno de los tiempos de recorrido objetivo utilizados como dato de entrada en cada optimización se corresponde con el tiempo de recorrido comercial indicado en la columna 5 de la Tabla 2-13. Además, se estableció un valor de $N = 2$ para el tamaño de la matriz de consignas de cada conducción, es decir, cada conducción estaría formada por una consigna de regulación sin freno seguida de una consigna de deriva final. Se seleccionó este valor para facilitar al máximo la aplicación precisa de las conducciones diseñadas, ya que las conducciones se ensayarían posteriormente y por primera vez en servicios comerciales.

Una vez diseñadas cada una de las seis conducciones eficientes, se procedió a la toma de medidas tanto de la implementación de las mismas como de otras conducciones realizadas por diferentes maquinistas durante servicios comerciales, con el objetivo de compararlas.

La Tabla 2-14 muestra el calendario de pruebas realizado, donde se designan como conducciones “guiadas” a aquellas conducciones diseñadas e implementadas por el maquinista. Por otro lado, las conducciones “no guiadas” hacen referencia a aquellas conducciones realizadas por diferentes maquinistas sin recibir instrucciones acerca de la conducción a realizar, es decir, según sus hábitos normales de conducción.

Recorrido	Fecha	Conducción
Madrid-Guadalajara-Calatayud-Zaragoza	10-nov-09	Guiada
Zaragoza-Calatayud-Guadalajara-Madrid	11-nov-09	Guiada
Madrid-Guadalajara-Calatayud-Zaragoza	11-nov-09	Guiada
Zaragoza-Calatayud-Guadalajara-Madrid	12-nov-09	Guiada
Madrid-Guadalajara-Calatayud-Zaragoza	12-nov-09	Guiada
Zaragoza-Calatayud-Guadalajara-Madrid	13-nov-09	Guiada
Madrid-Guadalajara-Calatayud-Zaragoza	16-dic-09	No guiada
Zaragoza-Calatayud-Guadalajara-Madrid	17-dic-09	No guiada
Madrid-Guadalajara-Calatayud-Zaragoza	17-dic-09	No guiada
Zaragoza-Calatayud-Guadalajara-Madrid	18-dic-09	No guiada
Madrid-Guadalajara-Calatayud-Zaragoza	19/20-dic-09	Guiada
Zaragoza-Calatayud-Guadalajara-Madrid	19/20-dic-09	Guiada
Madrid-Guadalajara	20/21-dic-09	Guiada
Guadalajara-Madrid	20/21-dic-09	Guiada
Madrid-Guadalajara-Calatayud	20/21-dic-09	Guiada
Calatayud-Guadalajara-Madrid	20/21-dic-09	Guiada

Tabla 2-14. Calendario de pruebas realizadas.

La Tabla 2-15 y Tabla 2-16 muestran los tiempos de recorrido, consumos energéticos brutos, energía regenerada y consumos energéticos netos, todos ellos en pantógrafo, medidos tanto para las conducciones guiadas como para las no guiadas. Las conducciones anómalas hacen referencia a aquellas conducciones que por su cantidad de incidencias se descartaron para la comparación entre conducciones guiadas y no guiadas, y únicamente se muestran con fines informativos.

	Madrid-Guadalajara		Guadalajara-Calatayud		Calatayud-Zaragoza	
	Tiempo de recorrido (hh:mm:ss)	Consumo bruto en pantógrafo (kWh)	Tiempo de recorrido (hh:mm:ss)	Consumo bruto en pantógrafo (kWh)	Tiempo de recorrido (hh:mm:ss)	Consumo bruto en pantógrafo (kWh)
Guiadas	23:30	1005,44	39:44	1984,57	25:15	876,07
	24:08	981,44	39:02	1782,33	25:08	876,44
	23:08	113,74	38:45	1939,57	25:54	769,04
	23:22	1057,99	40:09	1936,13		
	22:55	1045,06				
No guiadas	21:42	1335,42	38:40	2330,66	24:07	1334,37
	22:19	1321,90	39:07	2287,65	23:58	1293,32
	22:04	1341,75			24:37	1181,88
Anómalas	-	-	50:18	2348:59	-	-
			42:18	2371:76		

Tabla 2-15. Resultados medidos en conducciones guiadas y no guiadas en el servicio Madrid-Zaragoza.

	Zaragoza-Calatayud		Calatayud-Guadalajara		Guadalajara-Madrid	
	Tiempo de recorrido (hh:mm:ss)	Consumo bruto en pantógrafo (kWh)	Tiempo de recorrido (hh:mm:ss)	Consumo bruto en pantógrafo (kWh)	Tiempo de recorrido (hh:mm:ss)	Consumo bruto en pantógrafo (kWh)
Guiadas	26:16	1585,83	38:50	2555,65	29:35	294,62
	26:38	1505,47	36:39	2949,79	31:04	354,17
			37:04	2876,42	29:40	320,16
					34:17	399,53
No guiadas	24:20	1691,25	37:32	3012,28	23:13	905,95
	24:00	1690,37	38:54	2991,10	35:24	1114,43
	24:02	1822,22	36:54	2910,57	25:30	996,54
Anómalas	28:21	1699,02	40:16	3418,81	29:44	454,51

Tabla 2-16. Resultados medidos en conducciones guiadas y no guiadas en el servicio Zaragoza-Madrid.

La Figura 2-85 y Figura 2-86 muestran en el eje de abscisas el tiempo de recorrido y en el de ordenadas el consumo energético bruto en pantógrafo de las conducciones

anteriores, donde la línea discontinua azul indica el tiempo de recorrido comercial de cada uno de los trayectos.

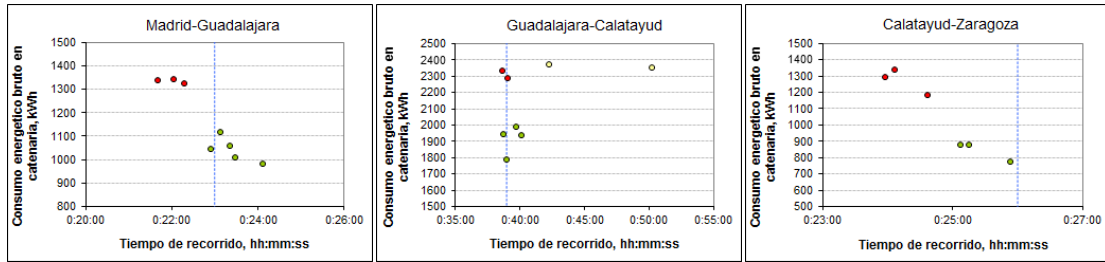


Figura 2-85. Tiempos de recorrido y consumos energéticos brutos en pantógrafo de conducciones guiadas y no guiadas en los tres trayectos del servicio comercial Madrid-Zaragoza.

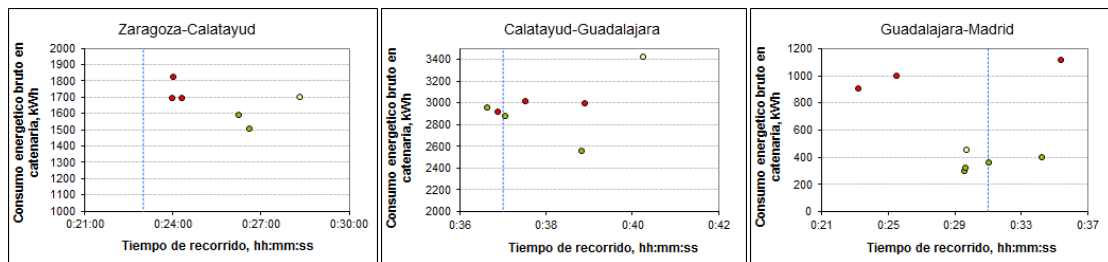


Figura 2-86. Tiempos de recorrido y consumos energéticos brutos en pantógrafo de conducciones guiadas y no guiadas en los tres trayectos del servicio comercial Zaragoza-Madrid.

Lo primero que se observa en estas gráficas es que, en los trayectos con mayores ratios de margen teórico (s/km), que fueron los trayectos Madrid-Guadalajara, Calatayud-Zaragoza y Guadalajara-Madrid, las conducciones no guiadas realizadas por los maquinistas suelen tener tiempos de recorrido menores que sus tiempos de recorrido comercial correspondientes. Esto indica, como se adelantó en el capítulo 1, que los maquinistas suelen conducir más rápido de lo necesario para garantizar la puntualidad, provocando llegadas anticipadas a las estaciones y consumos elevados, llegando en algunos casos a realizar una conducción muy similar a la marcha tendida. Esto pone de relieve la influencia de los maquinistas en la eficiencia energética; representan el último eslabón de todo el proceso de diseño de conducciones eficientes y de ellos depende su correcta implementación final.

En cuanto a las conducciones guiadas, se observa que algunos tiempos de recorrido son superiores a los tiempos de recorrido comerciales. Esto fue debido a la tendencia de algunos maquinistas a realizar las regulaciones de velocidad a velocidades ligeramente inferiores a las diseñadas. No obstante, en general las conducciones guiadas se ajustan a los tiempos de recorrido objetivo logrando ahorros energéticos significativos respecto a las no guiadas gracias a la aplicación de conducciones eficientes. Por ejemplo, en el trayecto Guadalajara-Calatayud se observa que una conducción guiada consigue un ahorro de un 24% respecto a otra no guiada con el mismo tiempo de recorrido.

El tiempo de holgura teórico de cada trayecto condiciona la capacidad de ahorro energético del mismo. La gran diferencia entre las holguras existentes en los trayectos Calatayud-Guadalajara y Guadalajara-Madrid hace que en el primero no se consigan

ahorros significativos (apenas había 0,71 s/km de holgura), y en cambio sí se consigan en el segundo, que contaba con una holgura de 10,92 s/km. Especial atención merece el trayecto Guadalajara-Madrid, en el que la matriz de consignas de la conducción diseñada fue la indicada en la ecuación 2.64.

$$M_c = [58,665 \quad 125] \quad 2.64$$

Esta conducción requería acelerar desde la estación de Guadalajara hasta alcanzar los 125 km/h, realizar una regulación sin freno hasta el punto kilométrico 58,665 y una vez alcanzado aplicar una deriva final, solo interrumpida por las curvas de freno para no rebasar las velocidades máximas en las proximidades de la estación de Atocha. La Figura 2-87 muestra el perfil de velocidad simulado de dicha conducción.

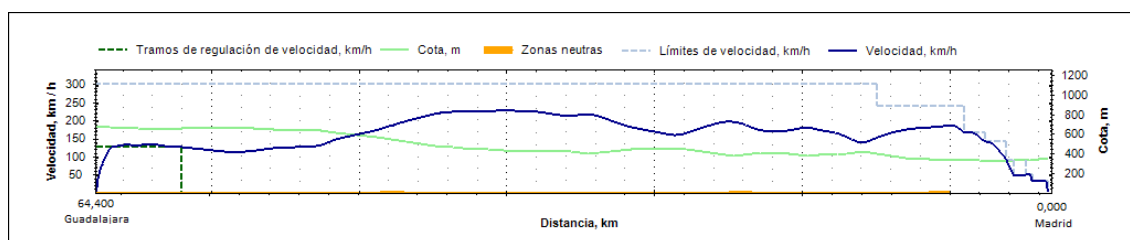


Figura 2-87. Conducción eficiente diseñada para el trayecto Guadalajara-Madrid.

Esta conducción supone realizar una deriva durante el 91% del trayecto (sin contar las derivas producidas durante el tramo de regulación sin freno), lo que provocó la desconfianza inicial de los maquinistas que la implementarían, que no creían al tren capaz de llegar a Madrid realizando una deriva desde el punto kilométrico 58,665. No obstante, dicha conducción estaba avalada por el modelo de simulación, y posibilitada por la holgura de tiempo disponible en el trayecto. Este diseño se confirmó en las pruebas reales, donde se midieron ahorros energéticos de hasta el 70% respecto a las conducciones habitualmente realizadas en el trayecto.

La Tabla 2-17 muestra el resumen de consumos medios obtenidos tanto con conducciones guiadas como no guiadas para cada uno de los trayectos de los servicios diseñados, donde además se indican los ratios de consumo por persona y kilómetro considerando la ocupación máxima del tren (318 pasajeros).

Servicio	Trayecto	Dist. (km)	Consumo bruto en pantógrafo No guiado (kWh)	Consumo bruto en pantógrafo Guiado (kWh)	Consumo bruto en pantógrafo No guiado (Wh/pna*km)	Consumo bruto en pantógrafo Guiado (Wh/pna*km)	Ahorro (%)
Madrid	Madrid-Guadalajara	64,4	1333,02	1040,74	65,09	50,82	21,93%
Zaragoza	Guadalajara-Calatayud	156,9	2309,15	1910,65	46,28	38,29	17,26%
3393	Calatayud-Zaragoza	85,4	1269,85	840,51	46,76	30,95	33,81%
	Total	306,7	4912,02	3791,90	50,36	38,88	22,80%
Zaragoza	Zaragoza-Calatayud	85,4	1734,61	1545,65	63,87	56,91	10,89%
Madrid	Calatayud-Guadalajara	156,9	2971,32	2793,95	59,55	56,00	5,97%
3372	Guadalajara-Madrid	64,4	1005,64	342,12	49,11	16,71	65,98%
	Total	306,7	5711,57	4681,72	58,56	48,00	18,03%

Tabla 2-17. Resultados medidos en conducciones guiadas y no guiadas en el servicio Madrid-Zaragoza y Zaragoza-Madrid.

Para establecer un orden de magnitud del ahorro económico diario que se podría conseguir mediante la conducción manual eficiente en los servicios ferroviarios de *Alta Velocidad*, se toma un el valor medio del coste de la energía de tracción pagado por Renfe en el año 2012, que fue 8,889 c€/kWh, al que se le añade aproximadamente un 15% de gastos de gestión que el Adif carga a la operadora, lo que da un total de 10,22 c€/kWh. Dados los resultados de la Tabla 2-17, si se supone un valor de ahorro económico medio de 36 c€/km (este valor en realidad dependerá de las características del servicio, la línea, el tren empleado y el maquinista) y teniendo en cuenta que en la actualidad se realizan 60.000 km diarios en servicios de *Alta Velocidad*, se podrían llegar a ahorrar 21.600 € diarios, es decir, 7,884 M€/año.

2.5. RESUMEN, CONCLUSIONES Y APORTACIONES

En este capítulo se ha descrito un modelo de diseño óptimo de conducciones manuales eficientes en trayectos ferroviarios de *Alta Velocidad* para un tiempo de recorrido objetivo minimizando la energía consumida. Para ello, se ha empleado un *Algoritmo Evolutivo* basado en un modelo de simulación de conducciones manuales.

El modelo de simulación ha sido diseñado para alcanzar una precisión elevada en sus cálculos de tiempos de recorrido y consumos energéticos, cuyas diferencias respecto a medidas reales han resultado ser inferiores al 1%. Para ello han sido modelados los siguientes elementos:

- Consideración de la longitud del tren, con influencia a la hora de calcular tanto la pendiente como el radio de curvatura instantáneos, además de en los límites de velocidad de la línea.
- Rendimientos de tracción y freno eléctrico ajustados con medidas reales.
- Modelado de las pérdidas en catenaria, que permiten calcular consumos brutos y netos (por regeneración) en subestaciones.
- Consideración de los túneles, en cuyo interior el término de segundo orden de la resistencia al avance se ve incrementado por el factor que define dicho túnel.
- Consideración de zonas neutras a lo largo de las cuales no hay alimentación eléctrica. Además, se considera el esfuerzo de freno que el tren proporciona durante las mismas para la alimentación de sus equipos auxiliares mediante freno regenerativo.
- Modelado del perfil de la línea mediante radios de acuerdo entre tramos de pendiente constante, definidos como arcos de parábola de segundo grado y eje vertical (Figura 2-12). Esta característica, junto con la consideración de la longitud del tren, hacen posible el cálculo de la pendiente instantánea como la media ponderada de las pendientes de cada uno de los sectores en que se encuentre el tren, consiguiendo que la pendiente instantánea utilizada en el simulador varíe suavemente a lo largo del trayecto.

- Modelado del trazado en planta mediante rectas, curvas y clotoides para tener en cuenta la resistencia al avance debida al radio de curvatura. A pesar de ser muy inferior a las resistencias debidas a la pendiente y al avance por el alto valor de los radios de curvatura en las líneas de *Alta Velocidad*, cabe su consideración para aumentar la precisión del simulador.
- Modelo de conducción manual que incluye todas las estrategias de conducción manual eficiente utilizadas en la literatura, y adaptada a las posibilidades reales de actuación del maquinista.

El modelo de simulación ha sido ajustado y validado con medidas reales para garantizar que los cálculos de tiempo de recorrido y consumos energéticos de conducciones manuales son fiel reflejo de la realidad. La validación constató la precisión del simulador, logrando diferencias de tiempo de recorrido y consumos energéticos del orden del 0,75% y 0,35% respectivamente entre medidas reales y simuladas (Tabla 2-7).

Una vez validado el modelo de simulación de conducciones manuales, es posible utilizarlo para el objetivo deseado; el diseño eficiente de conducciones manuales mediante un *Algoritmo Evolutivo*.

El objetivo del *Algoritmo Evolutivo* es la determinación de la conducción manual cuyo tiempo de recorrido es igual al tiempo de recorrido objetivo y que consume la mínima energía. Dada la sensibilidad de los resultados a la implementación final que los maquinistas hagan de las conducciones diseñadas, se ha establecido una estructura de conducción manual fácil de implementar, caracterizada por un conjunto de consignas de alto nivel definidas por estrategias de conducción eficiente, y a la vez lo suficientemente genérica como permitir una densa exploración en el espacio de soluciones. Esta estructura es codificada en una matriz de consignas y utilizada por el *Algoritmo Evolutivo*. Dicha matriz estará formada por un conjunto de N filas y dos columnas, dando lugar a $N + 1$ consignas de conducción. La primera columna indicará los puntos de cambio entre consignas, y la segunda las velocidades de las mismas. La estructura del modelo de conducción manual se ha determinado tras un análisis basado en simulación de las diferentes estrategias de conducción eficiente, proponiendo finalmente una estructura general basada en un conjunto de N tramos de regulación de velocidad sin freno seguidos de un tramo de deriva final, capaz de parametrizar el resto de estrategias de conducción eficientes encontradas en la literatura.

El *Algoritmo Evolutivo* evalúa las conducciones manuales por medio de su función fitness, que tiene en cuenta tanto su tiempo de recorrido (penalizando las conducciones cuyo tiempo de recorrido difiere del tiempo de recorrido objetivo) como el consumo energético, que se desea minimizar.

Para acelerar la ejecución del *Algoritmo Evolutivo* se estima el tiempo de recorrido de las conducciones generadas aleatoriamente antes de ser simuladas, y en caso de que dicha estimación esté alejada del tiempo objetivo, se corrigen las velocidades de regulación de la matriz de consignas, logrando que la conducción generada tenga un tiempo de recorrido similar al tiempo de recorrido objetivo y así disminuir el número de iteraciones del *Algoritmo Evolutivo*.

Además, se han definido unas funciones de cruce y mutación con objetivos complementarios. Mientras la función de cruce genera conducciones con tiempos de recorrido y consumos energéticos con gran dispersión para abrir el espacio de búsqueda, las conducciones mutadas se caracterizan por tener similar tiempo de recorrido y consumo energético que las conducciones de las que provienen.

Este método ha sido aplicado en servicios comerciales reales, realizando diseños de conducciones manuales para sus diferentes trayectos y ensayándolas tanto en horarios comerciales como en pruebas nocturnas. Se comprobó que el modelo de conducción propuesto resultó de fácil implementación por parte de los maquinistas, que no precisaron entrenamiento previo para aplicar con precisión las diferentes consignas.

Por otro lado, dada la tendencia de los maquinistas de los servicios de *Alta Velocidad* a realizar conducciones más rápidas de lo necesario, se ha confirmado el potencial de ahorro gracias al diseño de conducciones eficientes. En concreto, el ahorro medio obtenido fue de un 22,80% para el tramo Madrid-Guadalajara-Calatayud-Zaragoza, y de un 19,13% para el tramo en sentido inverso para las condiciones en que se realizaron los ensayos. La aplicación de conducciones guiadas no sólo tiene la ventaja de reducir el consumo energético, sino también de homogeneizar la conducción de los maquinistas, que en la actualidad presenta una dispersión elevada.

Las aportaciones originales correspondientes a este capítulo son las siguientes:

- Modelo de conducción manual especialmente adecuado para líneas de *Alta Velocidad* mediante consignas de alto nivel de regulación sin freno, que incluye todas las estrategias de conducción eficiente.
- Se ha mostrado en esta tesis por primera vez, con medidas reales en servicios comerciales y maquinistas profesionales no entrenados, el potencial de ahorro energético asociado al diseño óptimo de consignas de conducción de alto nivel, aplicadas manualmente en líneas de *Alta Velocidad*. Este enfoque tiene indudables ventajas frente a otros empleados por operadoras ferroviarias basados en ensayos de prueba y error.
- El *Algoritmo Evolutivo* propuesto permite minimizar el consumo en pantógrafo o subestación de una conducción dado un tiempo de recorrido objetivo. Está diseñado con funciones de cruce y mutación originales, que se han mostrado eficientes para la generación de nuevas conducciones. Estas funciones, junto

con la técnica de predicción del tiempo de recorrido para corregir velocidades y aproximar la nueva conducción al tiempo objetivo, han permitido tiempos de ejecución del algoritmo suficientemente bajos.

- El modelo de simulación propuesto para el diseño de las conducciones manuales de *Alta Velocidad* ha logrado un elevado nivel de precisión, y ha sido validado con registros tomados de servicios comerciales. Este aspecto es especialmente importante en líneas de *Alta Velocidad* con compromisos de puntualidad elevados. Los algoritmos de cálculo basados en modelos de simulación utilizados en la bibliografía no alcanzan este nivel de precisión, y en general no han sido validados con medidas reales.

OPTIMIZACIÓN DE HORARIOS BAJO INCERTIDUMBRE**3.1. INTRODUCCIÓN**

En el capítulo 2 se propuso un método para el diseño eficiente de conducciones manuales en servicios de *Alta Velocidad*. En este capítulo se desarrollará un modelo de optimización del horario comercial de un servicio de *Alta Velocidad* para minimizar la energía total consumida durante el mismo, cumpliendo requisitos de puntualidad y considerando que el tren se ve afectado por retrasos, que serán modelados mediante números borrosos.

Como se indicó en la introducción, un servicio comercial está formado por n estaciones y $n - 1$ trayectos, siendo un trayecto el recorrido entre dos estaciones consecutivas con parada comercial, como muestra la Figura 1-5.

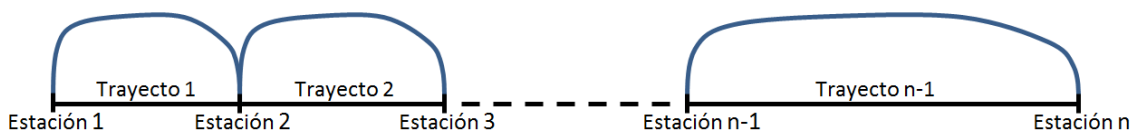


Figura 3-1. Estructura de un servicio comercial formado por n estaciones y $n - 1$ trayectos ($n \geq 2$).

El horario de un servicio comercial indica las horas de salida y llegada planificadas de cada estación, de manera que cada trayecto tiene asignado implícitamente un tiempo de recorrido comercial. Dicho tiempo se dimensiona mediante dos sumandos; por un lado el tiempo de recorrido mínimo, que es aquel obtenido al realizar una conducción a marcha tendida, y por otro el tiempo de holgura o margen teórico, que es un tiempo

añadido para la recuperación de retrasos y el cumplimiento de los requisitos de puntualidad del servicio, además de para evitar los siguientes efectos (Jong and Chang 2005b).

- Retrasos sistemáticos de los servicios.
- Ineficiencia de las conducciones.
- Continuo cambio entre tracción y freno propio de la conducción a marcha tendida, que resulta poco comfortable para el viajero.

Los retrasos pueden ser causados por factores muy diversos, como la gran afluencia de pasajeros, incidencias en los trenes o condiciones atmosféricas desfavorables (Higgins and Kozan 1998), (Kaas, Allan, and Hill 2000). Cuando un tren no tiene retraso, la holgura de tiempo disponible en el horario comercial puede emplearse en realizar conducciones económicas que permiten reducir el consumo energético en la operación del tráfico ferroviario.

El tiempo de recorrido comercial de un trayecto responderá por tanto a la ecuación 3.1.

$$T_{rc} = \underline{T_r} + T_h \quad 3.1$$

Siendo T_{rc} el tiempo de recorrido comercial a lo largo del trayecto, $\underline{T_r}$ el tiempo de recorrido mínimo y T_h el tiempo de holgura o margen teórico.

Una vez calculados los tiempos de recorrido mínimo de cada trayecto, el problema del diseño del horario de un servicio comercial consiste en calcular estos tiempos de holgura. Existen también otros tiempos de holgura, cuyo objetivo es dotar de robustez a la *malla* de explotación de las líneas ferroviarias, y que se añaden a los tiempos de intervalo mínimo de separación entre servicios comerciales adyacentes, cuyo objetivo es evitar que las perturbaciones del horario originadas en un servicio se propaguen a los siguientes.

Estos dos tipos de tiempos de holgura juegan a favor de la robustez de una malla ferroviaria, pero en contra de la capacidad de la misma, referida al número máximo de trenes por unidad de tiempo que pueden circular por una línea en condiciones seguras y robustas.

Al problema del diseño de horarios es conocido en la literatura como el problema de la planificación, que puede ir del caso más general (planificación de toda una malla horaria) al más particular (planificación de un servicio aislado). En cualquier caso, en todos ellos las variables de decisión son los diferentes tiempos de holgura definidos anteriormente, que deberán establecer un compromiso entre robustez y capacidad, de acuerdo a las necesidades del operador.

El dimensionamiento de los tiempos de holgura ha obedecido a criterios diferentes dependiendo del autor. Se han empleado para minimizar los tiempos de espera entre interconexiones (Golshani and Thomas 1981), (C. S. Chang and Kwan 2008), para maximizar la sincronización entre frenadas y arranques en una misma estación y así

aprovechar al máximo la energía regenerada durante las frenadas (Peña et al. 2011), para permitir cruces o sobrepasos entre trenes, para garantizar intervalos mínimos entre servicios (Gill and Goodman 1992), para ahorrar energía (Lancien and Fontaine 1981), (Hansen and Pachl 2008) y (Acikbas and Soylemez 2008), para mejorar los patrones de respuesta humanos (Carey 1998), e incluso para objetivos combinados, como la sincronización dinámica de horarios y el ahorro energético (Albrecht et al. 2002).

En los sistemas de Metro y Cercanías el diseño de horarios es una tarea compleja, ya que normalmente tienen frecuencias de trenes elevadas, topologías complejas y nudos concurrentes. En estos sistemas se hace necesario atender al mismo tiempo a muy diferentes aspectos: puntualidad, garantía de frecuencia de servicio y mejora de interconexiones para disminuir el tiempo de viaje del usuario.

Sin embargo, los sistemas de *Alta Velocidad* están caracterizados por topologías más sencillas que habitualmente no se explotan a la máxima capacidad. Esto reduce a dos los requisitos operativos que deben cumplir sus horarios: la rapidez y a la vez robustez, lo que deja un hueco al ahorro energético. Para cumplir el primero, los tiempos de holgura no deben estar sobredimensionados, lo que además podrían comprometer la capacidad de la línea. Por tanto, el dimensionamiento correcto de tiempos de holgura debe atender a un compromiso entre estos dos factores, sacando el máximo provecho de su distribución en cada trayecto del servicio para propiciar las conducciones eficientes.

Los tiempos de holgura de los servicios de *Alta Velocidad* española se dimensionan teniendo en cuenta el código UIC 451-1. Este código asigna a cada trayecto un tiempo de holgura mediante la suma de una parte proporcional tiempo de recorrido mínimo del mismo, otra parte asociada a su longitud y una última cantidad variable asociada al requisito de puntualidad en la estación de destino. Esta forma de asignar tiempos de holgura es conservadora, donde los trayectos con destino en estaciones con mayor tráfico gozan de mayores tiempos de holgura.

En (Bussieck, Winter, and Zimmermann 1997) se realiza un resumen de las técnicas más comunes empleadas para solucionar el problema de la planificación de las líneas ferroviarias, destacando los métodos de programación matemática como los más empleados, siendo (Amit and Goldfarb 1971) el trabajo más temprano, a partir del cual se han desarrollado numerosos trabajos, como el modelo no lineal de programación entera mixta combinado con Branch and Bound utilizado en (Higgins, Kozan, and Ferreira 1996), o el modelo de programación entera para el Metro de Berlín (C. Liebchen 2008).

Además de la programación matemática, también se han utilizado métodos de búsqueda heurísticos (Carey and Lockwood 1995), (D. R. Kraay and Harker 1995), (Higgins, Kozan, and Ferreira 1997), (Sahin 1999) o (Golshani and Thomas 1981), modelos de simulación (Hofman and Madsen 2005), y sistemas de inteligencia artificial (Abrila, Salidoa, and Barber 2008).

Para cumplir el objetivo de robustez de una planificación ferroviaria ante perturbaciones es necesario analizar la influencia de las incidencias producidas durante la explotación de los servicios, que se traducen en retrasos y perturbaciones del horario comercial. No obstante, muchos estudios de planificación no incorporan en sus modelos el estudio de retrasos (Acikbas and Soylemez 2008), (Ghoseiria, Szidarovszky, and Asgharpour 2004), (Kyung min, Suk-mun, and Moonseob 2010). Este hecho simplifica el problema de estudio, pero las conclusiones acerca de la robustez y puntualidad son solo válidas para los casos concretos de estudio, y no para el amplio abanico de incidencias a las que los servicios reales están expuestos. Es de vital importancia por lo tanto considerar la influencia de los retrasos en los estudios de planificación ferroviaria, considerando la incertidumbre asociada (Carey 1999).

En servicios en operación es relativamente sencillo disponer de información estadística acerca de la distribución de retrasos durante los mismos. Algunos estudios basados en estos casos han utilizado modelos de programación estocástica para resolver el problema de diseño de horarios bajo incertidumbre (Khan and Zhou 2010), donde se incorpora al modelo la incertidumbre asociada a las perturbaciones, cuyo objetivo es minimizar el tiempo total de recorrido comercial y reducir el tiempo de retraso esperado en la última estación del servicio.

La incertidumbre también ha sido aplicada al número de pasajeros que interaccionan en cada estación. Por ejemplo, en (Yang, Gao, and Li 2010) se resuelve el problema de la planificación de horarios en líneas de doble vía mediante un modelo de programación lineal entera mixta combinado con un algoritmo de Branch and Bound.

Otros estudios basados en problemas de optimización robusta que garanticen una solución factible en todos los escenarios son a veces demasiado conservadores. Estudios que permiten cierta relajación de estos modelos han sido propuestos en (Fischetti and Monaci 2009) y (M. Liebchen et al. 2009), combinando Programación Estocástica y Optimización Robusta.

Cuando se tiene una línea de nueva construcción o el horario a diseñar corresponde a un servicio que aún no está en operación, la información estadística de las incidencias en los horarios no estará disponible para ser incorporada a los modelos de estudio. En el caso de España, además, es frecuente la modificación semestral de los horarios de los servicios de *Alta Velocidad*, acortando ligeramente los tiempos de recorrido para adaptarlos a la creciente demanda, lo cual provoca que los datos estadísticos que pudieran haberse recopilado dejen de ser válidos. Por este motivo, la incertidumbre no es siempre modelable mediante información estadística. Como se indica en (Jovanovic and Harker 1991), en la práctica los operadores no disponen de casi ningún medio, a parte de su experiencia, para predecir el comportamiento de un servicio ante nuevos horarios.

Para dar una solución a este problema se ha empleado el conocimiento borroso en muy distintas áreas de conocimiento. Fue introducido por L.A. Zadeh en 1965 (Zadeh 1965), que está considerado como el punto de inflexión en el tratamiento de la incertidumbre. Zadeh introduce una teoría donde los objetos son conjuntos borrosos cuyas fronteras son imprecisas. Según ellos, la toma de decisiones en un escenario

borroso se refiere a todo proceso de decisión donde los objetivos y/o las restricciones del sistema son borrosos en su naturaleza, pero no necesariamente el sistema bajo control, lo cual sugiere que los objetivos y/o restricciones constituyen clases de alternativas cuyas fronteras no están claramente definidas. En este contexto, una decisión borrosa intersecará varios objetivos y restricciones, y una decisión de maximización será definida como un punto en el espacio de alternativas donde la función de pertenencia de la decisión borrosa alcanza un valor máximo.

La Programación Matemática Borrosa permite considerar tolerancias para los valores de los parámetros del modelo de decisión de una manera más directa y natural, de especial importancia en situaciones donde la necesidad de considerar dichas tolerancias es debida a la imposibilidad de determinar los parámetros de forma precisa, o en situaciones en las que dichas tolerancias son asumidas conscientemente por el decisor (Chanas, Ko Odziejczyk, and Machaj 1984). La lógica borrosa proporciona un marco idóneo para la representación del conocimiento en ambientes de incertidumbre.

La incertidumbre considerada en la teoría borrosa no es aleatoria, sino relacionada con la ausencia de transición clara entre pertenencia y no pertenencia. La pertenencia a un conjunto borroso no es una cuestión binaria, sino continua. De esta manera, un conjunto clásico puede ser considerado como un caso particular de un conjunto borroso donde solo se permiten dos grados de pertenencia (0 y 1). Los conjuntos borrosos son introducidos como una tentativa de modelar los problemas del mundo real, donde muchas de las decisiones que se toman tienen lugar en un entorno donde tanto los objetivos, las restricciones y las consecuencias de las posibles acciones no se conocen de manera precisa. Para tratar con esta imprecisión, se utilizan frecuentemente técnicas basadas en la teoría de la probabilidad, herramientas de teoría de la decisión, control e información, aceptando de esta manera que toda imprecisión, cualquiera que sea su naturaleza, puede ser abordada mediante aleatoriedad. Según palabras del propio L.A. Zadeh (Zadeh 1973) "the essence of this principle is that as the complexity of a system increases, our ability to make precise and yet significant statements about its behavior diminishes until a threshold is reached beyond which precision and significance (or relevance) becomes almost mutually exclusive characteristics".

Según (R. E. Bellman and Zadeh 1970) es necesaria una diferenciación entre aleatoriedad y borrosidad, imprecisión asociada a conjuntos borrosos, es decir, clases donde no hay una transición abrupta entre pertenencia y no pertenencia. Dan un paso adicional afirmando que la diferencia que distingue a los humanos de los ordenadores es la habilidad de los primeros para manipular conceptos borrosos y responder a instrucciones borrosas. De esta manera, mientras que la aleatoriedad se refiere a la incertidumbre asociada a la pertenencia o no pertenencia de un objeto a un conjunto no borroso, la borrosidad trata con clases donde hay grados de pertenencia entre la pertenencia total y la no pertenencia.

La función objetivo de los modelos de Programación Matemática Borrosa es tratada como una restricción más, cuyos umbrales inferior y superior definen las expectativas

del decisor (Zimmermann 1976), (Tanaka and Asai 1984), (Chanas, Ko Odziejczyk, and Machaj 1984).

Ya que las variables borrosas capturan la incertidumbre como parte de los datos experimentales, con ellas se puede estudiar de una manera más realista que con variables clásicas. Es una curiosa paradoja el que las variables borrosas proporcionan evidencias más precisas acerca de fenómenos reales de las que proporcionan las variables clásicas. Según palabras de Albert Einstein pronunciadas en 1921: "So far as laws of mathematics refer to reality, they are not certain. And so far as they are certain, they do not refer to reality". Las ventajas de la borrosificación de los sistemas reales es la mayor generalización y capacidad para modelar problemas reales, además de proponer una metodología para manejar la tolerancia debida a la imprecisión, que permite alcanzar la robustez en el análisis de sistemas reales a un coste bajo, (Klir and Yuan 1995).

Los primeros trabajos en que se aplicó la teoría de conjuntos borrosos a problemas de decisión fueron (S. S. L. Chang 1969) y (R. E. Bellman and Zadeh 1970), a los que siguieron estudios sobre el problema del transporte (Chanas, Ko Odziejczyk, and Machaj 1984) y (Chanas and Kuchta 1998). La programación matemática borrosa trata de optimización bajo incertidumbre, caracterizando los parámetros de la función objetivo mediante números borrosos, y expresando las restricciones del modelo con conjuntos borrosos, lo cual relaja las propias restricciones, permitiendo que éstas puedan ser incumplidas en alguna ocasión. Según (Chanas, Ko Odziejczyk, and Machaj 1984), la programación lineal borrosa permite considerar las tolerancias de los parámetros utilizados en los modelos, especialmente útil cuando no se pueden determinar sus valores de forma precisa.

Esta técnica ha sido aplicada para diferentes problemas de planificación, como en (Chanas, Ko Odziejczyk, and Machaj 1984), donde se analiza el problema del transporte utilizando valores de demanda borrosos. En (Sakawa, Nishizaki, and Uemura 2002) se estudia el problema del transporte desde un almacén, utilizando grados de satisfacción con los objetivos establecidos por el mismo. En (Y. H. Chang and Yeh 2004) se desarrolla un modelo de programación multiobjetivo para la colocación óptima de servicios ferroviarios de *Alta Velocidad* con el objetivo de minimizar los costes operativos, y en (Ren and Sheridan 1994) el problema del diseño de horarios en trenes de mercancías es resuelto mediante un modelo de programación lineal borroso coordinado con una base de conocimiento también borrosa.

El conocimiento borroso se ha empleado para minimizar los retrasos en (Chanas and Kasperski 2001). También se ha empleado en combinación con algoritmos genéticos (Vasant and Barsoumb 2009), para la gestión del tráfico (Balaji and Srinivasana 2011) y para otro conjunto de aplicaciones ferroviarias (Sahin 1999), donde se resuelve el problema de negociación entre el proveedor del material rodante y el proveedor de infraestructura mediante priorización de restricciones borrosas, o (Jia and Zhanga 1994) y (Fay 2000), donde se propone un sistema de control de tráfico basado en un modelo de conocimiento borroso.

Por otro lado, en (C. S. Chang and Thia 1996) se presenta un sistema de diseño de horarios en tiempo real mediante la aplicación de sistemas expertos borrosos que controlan el tiempo de holgura en estación, definiendo la regularidad, el riesgo y la congestión en andenes mediante conjuntos borrosos. En (Yang, Li, and Gao 2009) se centran en el diseño de horarios para líneas de vía única modelando la incertidumbre del pasajero relacionada con el tiempo borroso de subida y bajada del tren para minimizar el tiempo de retraso total utilizando un algoritmo Branch and Bound. En (Isaai et al. 2011) se propone un modelo de selección del horario óptimo aplicando fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process) para la evaluación multidimensional del servicio, lidiando con la vaguedad existente en la evaluación de horarios. La misma técnica es empleada en (Hanaoka and Kunadhamraks 2009) para evaluar el desarrollo logístico de trenes de carga intermodales.

Ninguno de los trabajos señalados anteriormente tiene como objetivo la minimización del consumo energético. Hay algunos estudios en literatura donde se trata el tema de la minimización del consumo en el diseño de horarios, pero en ellos no se considera la incertidumbre asociada a los retrasos.

El problema de optimización de horarios propuesto en (D. Kraay, Harker, and Chen 1991) considera la minimización del consumo de combustible y de los tiempos de retrasos, empleando un modelo de programación lineal entera mixta con una función objetivo convexa. El modelo de consumo propuesto está simplificado y no tiene en cuenta los límites del esfuerzo de tracción. Por otro lado, en (Ghoseiria, Szidarovszky, and Asgharpour 2004) se propone un modelo de programación lineal entera mixta multiobjetivo para minimizar el tiempo total de viaje y el consumo de combustible donde no se considera la incertidumbre, además de que el consumo energético se calcula para una velocidad media, con un esfuerzo de tracción no acotado, por lo que los cálculos están muy simplificados.

En (Kwan and Chang 2005) se aplica un algoritmo heurístico evolutivo para diseñar el horario de un sistema MRT (Mass Rapid Transit), de manera que se minimicen los costes operativos y se maximice la satisfacción del viajero, lo cual requiere un regulador automático para la aplicación dinámica online del horario. En este trabajo se usa el coste asociado al consumo energético, aunque no especifican su cálculo. En cada estación de salida se escoge entre tres posibles perfiles de velocidad. Su método es únicamente aplicable en líneas metropolitanas equipadas con sistemas ATO embarcados, además de restringir en gran medida el modelo de conducciones, y no tener en cuenta los retrasos.

En (K. Kim, Oh, and Han 2010) se propone un modelo de programación matemática para el diseño de horarios que reduzcan el máximo de energía consumida en sistemas MRT. Dado un horario inicial, éste se modifica para conseguir el citado objetivo. Lo que hace el modelo no es minimizar el consumo, sino las pérdidas eléctricas y las caídas de tensión, además de que los retrasos y restricciones de puntualidad no se utilizan.

En (Malavasi, Palleschi, and Ricci 2011) se proponen diversos modelos para estimar el consumo de una línea de metro y el impacto de la energía transferida entre ellos en

cuanto al consumo energético. El simulador que emplean podría ser utilizado para sincronizar fases de frenado con fases de aceleración con el objetivo de maximizar la transferencia de energía regenerada durante los frenados regenerativos.

Una vez diseñado el horario, hay estudios que se encargan de analizar su robustez o capacidad para absorber incidencias producidas, que tienen naturaleza aleatoria. Este problema se ha estudiado en numerosas ocasiones en la literatura. En (Higgins and Kozan 1998) se propuso un modelo analítico para estimar el retraso esperado en trenes y puntos importantes de la línea en redes ferroviarias complejas, considerando tanto fuentes de retraso directas, como retardos producidos por otros trenes adyacentes.

Por otro lado, existe otra rama de la planificación ferroviaria más relacionada con la explotación de las líneas en tiempo real. En (D'Ariano et al. 2008) se desarrollan sistemas de ayuda a la decisión para el control del tráfico y el reordenamiento de los horarios en tiempo real ante incidencias, y en (C. S. Chang and Thia 1996) se propone un sistema experto borroso para el mismo propósito, para su ejecución online.

En (L. Wang et al. 2012) se propone un modelo de optimización borroso para el rediseño de horarios de líneas de *Alta Velocidad* en tiempo real sujetos a interferencias no planificadas, con el objetivo de minimizar el tiempo total de retraso de los trenes afectados.

Una vez se ha formulado un problema de Programación Matemática Borroso, en la práctica se acudirá a los solvers clásicos para obtener la solución de problemas de Programación Matemática clásicos equivalentes. En los sistemas de Programación Lineal Borrosa hay varios procedimientos para calcular soluciones de compromiso, que difieren unas de otras en los supuestos que se adoptan para reducir dichos problemas a problemas de optimización clásica (Rommelfanger 1996). En cualquier caso, cualquier procedimiento encontrado en la literatura implica seguir un proceso interactivo de pasos.

En este capítulo se presenta un modelo de optimización para el diseño óptimo de horarios ferroviarios que responde a las características particulares de la red de *Alta Velocidad*: largas interestaciones, capacidad disponible, tráfico homogéneo, compromisos de puntualidad e infraestructuras sencillas. Sus objetivos serán la minimización del consumo energético global del servicio y el cumplimiento de requisitos de puntualidad, teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a los retrasos que se generan durante los mismos y que serán modelados mediante conjuntos borrosos. El modelo de optimización que se propone es por tanto un modelo de programación matemática borroso.

El modelo propuesto también incluirá un modelo de respuesta conductual borrosa de los maquinistas que tendrá en cuenta su comportamiento al producirse retrasos durante el servicio, ya que éstos tienden a recuperar los retrasos lo antes posible, lo que afecta al consumo de la marcha.

3.2. MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE HORARIOS BAJO INCERTIDUMBRE

En este apartado se describirá el modelo de optimización bajo incertidumbre del horario de un servicio comercial en *Alta Velocidad*, cuyo objetivo es la minimización del consumo energético global del mismo imponiendo restricciones de puntualidad. Para ello el modelo incorporará la influencia de los retrasos originados durante un servicio, que serán modelados como números borrosos.

Se define tiempo de recorrido comercial total de un servicio ($T_{rc,total}$) como el tiempo planificado desde su salida comercial de la estación inicial hasta la llegada comercial a la estación final, ambas indicadas en su horario comercial. La Figura 3-2 muestra la malla de explotación de la línea Barcelona-Madrid en 2009, donde se ha resaltado un servicio con dos paradas intermedias, señalando su tiempo de recorrido comercial total.

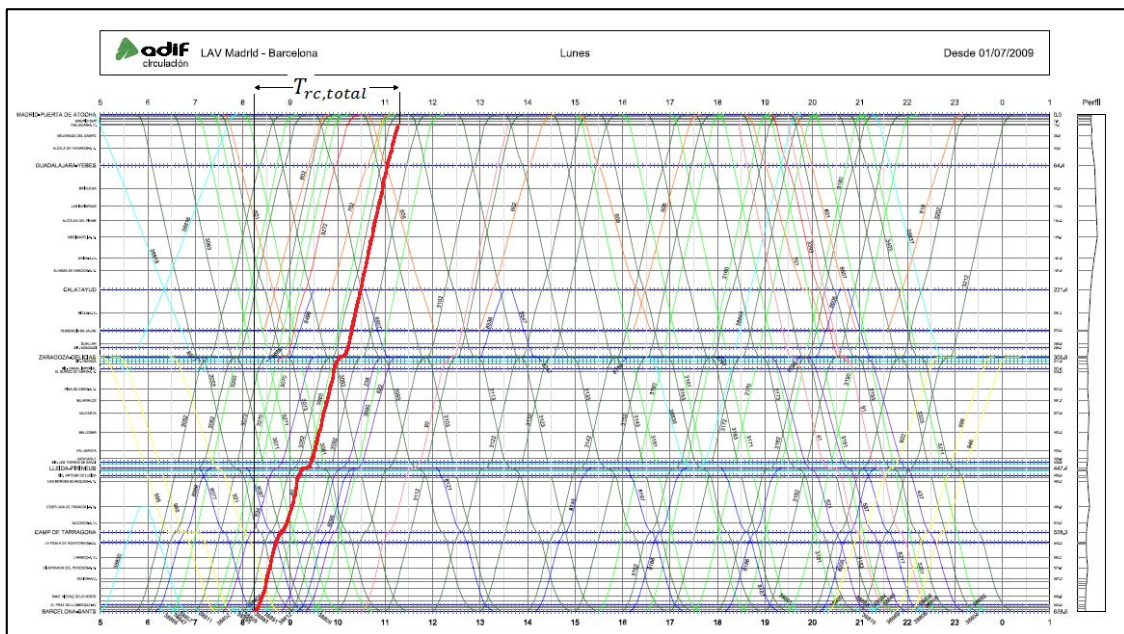


Figura 3-2. Malla de explotación de la línea Madrid-Barcelona en 2009. Fuente: Adif.

Para lograr la minimización del consumo energético global de un servicio será necesaria la combinación de dos factores clave; por un lado el desarrollo de conducciones eficientes, y por otro el diseño óptimo del horario del mismo.

Modelo de diseño conjunto de horario y conducción económica

En el capítulo 2 se expuso un método para calcular el conjunto de conducciones de mínimo consumo energético para cada tiempo de recorrido, que forman la curva de Pareto de cada trayecto. Estas $n - 1$ curvas de Pareto de cada servicio serán utilizadas como datos de entrada al modelo de programación matemática borrosa que se describe en este capítulo. El resultado del mismo será el tiempo de recorrido comercial de cada trayecto, que corresponderá a una conducción eficiente concreta en cada curva de Pareto. A partir de los tiempos de recorrido y de parada se obtendrá

el horario comercial completo del servicio. Este enfoque requiere el diseño conjunto del horario y la conducción eficiente asociada para cumplirlo (Figura 3-3).

La función objetivo del modelo de optimización consistirá en la minimización del consumo energético del servicio, y se le impondrán restricciones de puntualidad. El modelo incorporará la influencia de los retrasos originados a la salida de cada estación del servicio, que serán modelados como conjuntos borrosos. Además, en los trayectos donde exista un determinado retraso, se tendrá en cuenta que en general los maquinistas tratarán de recuperarlo lo antes posible, aumentando considerablemente el consumo respecto a la conducción nominal. A este tipo de conducciones se les llamará conducciones de recuperación de retraso. Este comportamiento del maquinista será incluido en el modelo, y al igual que los retrasos, tendrá naturaleza borrosa.

Por tanto, las características principales del modelo de optimización propuesto son las siguientes:

- El objetivo del modelo de optimización es la minimización de la energía global consumida por un servicio comercial.
- El modelo incluye la incertidumbre asociada a los retrasos ocurridos durante el servicio, modelados mediante conjuntos borrosos.
- Se deberán satisfacer las restricciones de puntualidad impuestas por el operador, que serán modeladas mediante medidas de necesidad de puntualidad a la llegada a cada estación.
- Se modelará la respuesta conductual borrosa: el propio modelo de optimización incorporará el efecto en la conducción y el consumo que tendría la aparición de un retraso. Además, se modelará la incertidumbre asociada al grado de rapidez con el que el maquinista desee recuperar el retraso.

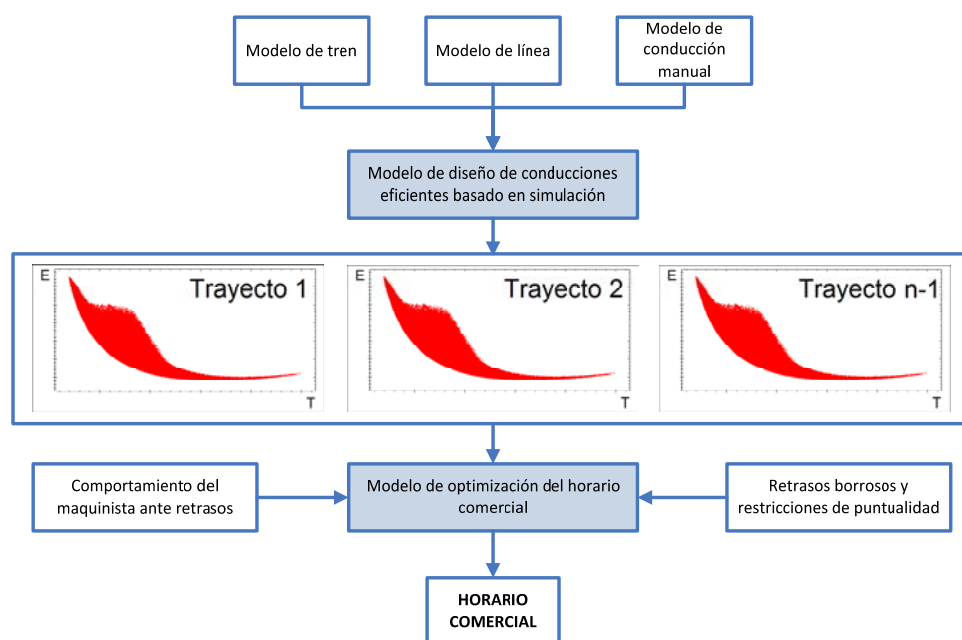


Figura 3-3. Diseño conjunto de horario y conducción eficiente.

Holguras de tiempo en el diseño del horario

En la práctica, distribuir de forma óptima el tiempo de recorrido comercial total de un servicio en cada trayecto es equivalente a distribuir el tiempo de holgura total del mismo, calculado mediante la ecuación 3.2.

$$T_{h,total} = T_{rc,total} - \sum_{i=1}^{n-1} T_{p,i} - \sum_{i=1}^{n-1} \underline{T_{r,i}} \quad 3.2$$

Siendo $T_{h,total}$ el tiempo de holgura total del servicio comercial, $T_{rc,total}$ el tiempo de recorrido comercial total del servicio desde la salida de la estación origen (1) hasta la llegada a la estación de destino (n), y que fijará el operador, $T_{p,i}$ el tiempo de parada comercial en la estación i , y $\underline{T_{r,i}}$ el tiempo de recorrido mínimo en el trayecto i , obtenido al circular a marcha tendida.

Por tanto, las variables que optimizará el modelo propuesto serán las holguras de tiempo de cada trayecto ($T_{h,i}$) del servicio comercial de manera que se satisfaga la ecuación 3.3.

$$T_{h,total} = \sum_{i=1}^{n-1} T_{h,i} \quad 3.3$$

Siendo $T_{h,total}$ el tiempo de holgura total del servicio comercial y $T_{h,i}$ el tiempo de holgura o margen teórico del trayecto i .

Una vez determinado el tiempo de holgura o margen teórico de cada trayecto, el tiempo de recorrido comercial del mismo será igual a la suma de éste y el tiempo de recorrido mínimo, según indica la ecuación 3.4.

$$T_{rc,i} = \underline{T_{r,i}} + T_{h,i} \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.4$$

Siendo $T_{rc,i}$ el tiempo de recorrido comercial, $\underline{T_{r,i}}$ el tiempo de recorrido mínimo y $T_{h,i}$ el tiempo de holgura o margen teórico, todos ellos en el trayecto i .

La Figura 3-4 muestra un detalle del trayecto Madrid-Zaragoza, donde se muestra en trazo rojo el horario correspondiente a la conducción a marcha tendida, y en trazo verde el de la conducción comercial, siendo la diferencia entre ambos el tiempo de holgura o margen teórico asignado a dicho trayecto.

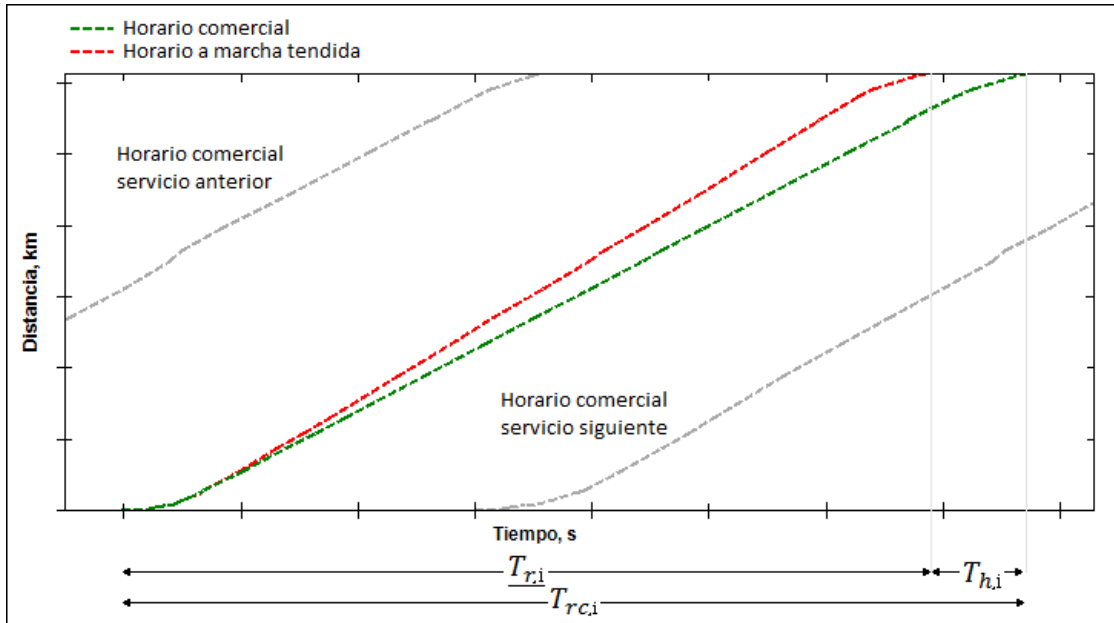


Figura 3-4. Surco horario del trayecto Madrid-Zaragoza.

La Figura 3-5 muestra un gráfico tiempo de recorrido-consumo energético de un trayecto, donde cada punto representa una conducción y donde se representan las variables tiempo de recorrido mínimo ($T_{r,i}$), tiempo de holgura o margen teórico ($T_{h,i}$) y tiempo de recorrido comercial ($T_{rc,i}$).

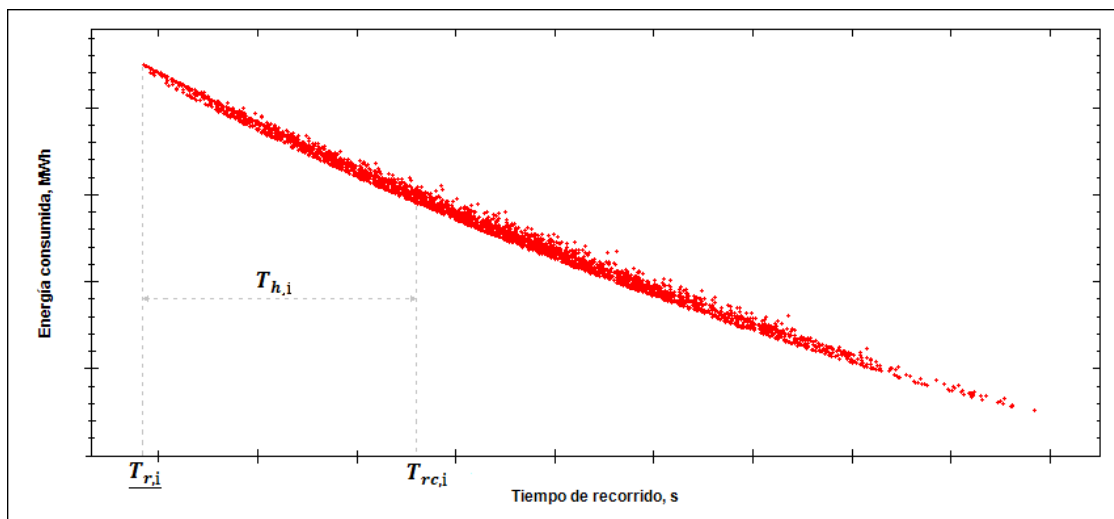


Figura 3-5. Tiempo de recorrido mínimo, tiempo de holgura o margen teórico y tiempo de recorrido comercial de un trayecto.

Modelado borroso de retrasos, puntualidad y función objetivo

La fuente de incertidumbre del modelo de optimización estará formada por los retrasos producidos durante el servicio, que serán modelados mediante números borrosos. Además, se asumirá que el origen de los mismos estará localizado en las estaciones del servicio, de manera que un tren que llegue puntual a una estación podrá sufrir un retraso que provoque una salida posterior a la indicada en el horario

comercial. De la misma manera, un tren que llegue retrasado a una estación podrá aumentar su retraso durante la parada.

Los retrasos serán modelados mediante un número borroso (Fay 2000) definido por la función de pertenencia indicada en la ecuación 3.5.

$$\mu_{\hat{T}_{d,i}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ \frac{1-\lambda_i}{a_i} \cdot x + \lambda_i & \text{si } 0 \leq x \leq a_i \\ \frac{1}{a_i-b_i} \cdot x - \frac{b_i}{a_i-b_i} & \text{si } a_i < x \leq b_i \\ 0 & \text{si } x > b_i \end{cases} \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.5$$

Siendo $\mu_{\hat{T}_{d,i}}(x)$ la función de pertenencia del tiempo de retraso borroso $\hat{T}_{d,i}$ producido en la estación i , λ_i la posibilidad de retraso nulo en la estación i , a_i el núcleo del conjunto borroso y b_i al valor máximo de retraso, al que se le asignará una posibilidad nula (Figura 3-6).

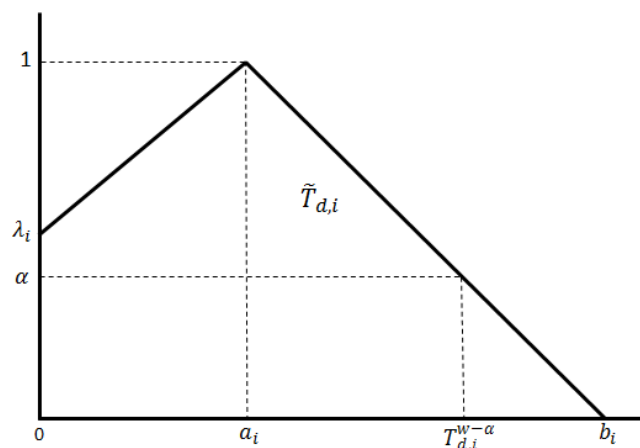


Figura 3-6. Tiempo de retraso borroso a la salida de la estación i ($\hat{T}_{d,i}$).

Cuando un tren sale de una estación con un cierto tiempo de retraso, el maquinista deberá realizar una conducción más rápida que la nominal a lo largo del trayecto siguiente para recuperarlo y llegar puntual a la siguiente estación (siempre que el tiempo de holgura lo permita). Este comportamiento se modelará con una restricción de puntualidad, que será medida a la llegada a cada estación, ya que de esta forma es como las operadoras establecen sus compromisos de puntualidad con los viajeros. De esta manera, en un escenario donde se ha producido un retraso, la llegada a una estación será puntual si es menor o igual a la hora de llegada correspondiente indicada en el horario comercial

Al modelar los retrasos mediante números borrosos, las llegadas a estación serán también números borrosos, y por tanto la restricción de puntualidad a la llegada se expresará como indica 3.6, indicando que el tiempo de llegada a una estación bajo un escenario con retraso deberá ser aproximadamente menor o igual al tiempo de llegada comercial, permitiendo así un cierto grado de incumplimiento de la restricción

(Tanaka and Asai 1984; Chanas, Ko Odziejczyk, and Machaj 1984). Este grado de incumplimiento deberá ser tal que se garantice el requisito de puntualidad en la estación, como se detallará más adelante.

$$\hat{T}_{ll,i}^w \lesssim T_{ll,i} \quad \forall 1 < i \leq n \quad 3.6$$

Siendo $\hat{T}_{ll,i}^w$ el tiempo borroso de llegada a la estación i bajo un escenario con retraso w y $T_{ll,i}$ el tiempo de llegada comercial a la estación i .

Sea el problema de programación lineal clásico cuya función objetivo consiste en la minimización del consumo energético total de un servicio comercial. La función objetivo de dicho problema estará definida por la ecuación 3.7.

$$\min \sum_{i=1}^{n-1} C_i = \min(C_{total}) \quad 3.7$$

Siendo C_i el consumo energético asociado a la conducción nominal en el trayecto i y C_{total} el consumo energético global del servicio.

Al transformar un modelo de programación lineal clásico en uno de programación lineal bajo incertidumbre borroso, la función objetivo de la ecuación 3.7 podrá ser expresada en términos de satisfacción de un objetivo borroso, es decir, el consumo energético global del servicio comercial deberá ser aproximadamente menor o igual que dicho objetivo borroso, según indica la ecuación 3.8 (Tanaka and Asai 1984; Chanas, Ko Odziejczyk, and Machaj 1984).

$$\hat{C}_{total} \lesssim \hat{Z} \quad 3.8$$

Siendo \hat{C}_{total} el consumo energético global del servicio y \hat{Z} el objetivo borroso.

El problema de optimización borroso tratará de maximizar la posibilidad de que el consumo borroso total sea menor que el objetivo borroso, minimizando así el consumo. Este modelo de programación matemática borrosa se formula mediante funciones borrosas. Por tanto, se calculará la máxima posibilidad de cumplir todas las restricciones y la función objetivo mediante la aplicación del principio de extensión y los operadores Max-Min.

Modelo de tráfico

Como se mencionó anteriormente, el tiempo total de viaje de un servicio comercial suele estar fijado por el operador. Por tanto, la suma de las holguras de cada trayecto debe ser igual a la holgura total disponible entre estaciones terminales, según indica la ecuación 3.9.

$$T_{h,total} = \sum_{i=1}^{n-1} T_{h,i} \quad 3.9$$

Siendo $T_{h,total}$ el tiempo de holgura total del servicio comercial y $T_{h,i}$ el tiempo de holgura o margen teórico del trayecto i .

El tiempo de recorrido comercial de cada trayecto estará acotado superiormente por un tiempo de recorrido máximo permitido con el fin de evitar conducciones excesivamente lentas. Este límite superior del tiempo de recorrido comercial se traducirá en un tiempo de holgura máximo para cada trayecto, calculado mediante la ecuación 3.10.

$$\overline{T_{h,i}} = \overline{T_{r,i}} - \underline{T_{r,i}} \quad \forall 1 < i \leq n \quad 3.10$$

Siendo $\overline{T_{h,i}}$ el tiempo de holgura máximo, $\overline{T_{r,i}}$ el tiempo de recorrido máximo permitido y $\underline{T_{r,i}}$ el tiempo de recorrido mínimo (correspondiente a la marcha tendida), todos ellos en el trayecto i .

Del mismo modo, se establecerá un valor mínimo de tiempo de holgura en cada trayecto para dotar de un mínimo requisito de robustez ante incidencias a todos los trayectos del servicio. Su valor será establecido por el operador ferroviario. Así, el tiempo de holgura o margen teórico de cada trayecto estará acotado inferior y superiormente según las restricciones indicadas en las ecuaciones 3.11 y 3.12.

$$T_{h,i} \leq \overline{T_{h,i}} \quad \forall 1 < i \leq n \quad 3.11$$

$$T_{h,i} \geq \underline{T_{h,i}} \quad \forall 1 < i \leq n \quad 3.12$$

Siendo $T_{h,i}$ el tiempo de holgura o margen teórico, $\overline{T_{h,i}}$ el tiempo de holgura máximo y $\underline{T_{h,i}}$ el tiempo de holgura mínimo, todos ellos en el trayecto i .

A modo explicativo, las restricciones anteriores se pueden expresar en función del tiempo de recorrido en cada trayecto según las ecuaciones 3.13 y 3.14, aunque las variables del modelo de optimización sean las holguras en cada trayecto.

$$T_{rc,i} \geq \underline{T_{r,i}} + \underline{T_{h,i}} \quad \forall 1 < i \leq n \quad 3.13$$

$$T_{rc,i} \leq \underline{T_{r,i}} + \overline{T_{h,i}} \quad \forall 1 < i \leq n \quad 3.14$$

Siendo $T_{rc,i}$ el tiempo de recorrido comercial, $\underline{T_{r,i}}$ el tiempo de recorrido mínimo, $\underline{T_{h,i}}$ el tiempo de holgura mínimo y $\overline{T_{h,i}}$ el tiempo de holgura máximo, todos ellos en el trayecto i .

La ecuación 3.15 expresa el tiempo de salida comercial de una estación en función del tiempo de salida comercial de la estación anterior.

$$T_{s,i+1} = T_{s,i} + \left(\underline{T_{r,i}} + \underline{T_{h,i}} \right) + T_{p,i+1} \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.15$$

Siendo $T_{s,i+1}$ el tiempo de salida comercial de la estación $i + 1$, $T_{s,i}$ el tiempo de salida comercial de la estación i , $\underline{T}_{r,i}$ el tiempo de recorrido mínimo, $T_{h,i}$ el tiempo de holgura o margen teórico, ambos en el trayecto i , y $T_{p,i}$ el tiempo de parada comercial en la estación i .

Por otro lado, se debe modelar el tráfico en escenarios con retraso con el objetivo de comprobar los requisitos de puntualidad a la llegada a cada estación. Como se indicó anteriormente, los retrasos se modelarán como números borrosos originados a la salida de cada estación, y que se añadirán a la hora de salida de las mismas. Cuando un tren sale con retraso de la estación i , la holgura de tiempo del trayecto i será empleada para llegar puntual a la estación $i + 1$. Si el tiempo de holgura o margen teórico comercial del trayecto i es inferior al tiempo de retraso a la salida del mismo, no será posible recuperar todo el retraso durante la conducción, ni siquiera aplicando marcha tendida, con lo que se llegará con un cierto tiempo de retraso a la estación $i + 1$. En ese caso, el tiempo de parada en dicha estación $i + 1$ será inferior al tiempo de parada comercial, con el objetivo de minimizar el retraso del tren. A continuación, el nuevo retraso que pudiera aparecer en la estación $i + 1$ se tratará de recuperar durante la conducción en el trayecto $i + 1$.

El comportamiento descrito anteriormente se introduce en el modelo de optimización a través de la ecuación 3.16 y 3.17, que establece el tiempo de salida de una estación en función del tiempo de salida de la estación anterior en un escenario con retraso w . Ante una situación así, el tiempo de salida de la estación $i + 1$ se calculará antes de introducir un nuevo retraso en dicha estación, y será función del tiempo de salida de la estación i y del nuevo retraso originado a la salida de dicha estación, modelado como un número borroso $\hat{T}_{d,i}$.

$$T_{s,i+1}^w = T_{s,i}^w + \hat{T}_{d,i} + (\underline{T}_{r,i} + T_{h,i}^w) + T_{p,i+1}^w \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.16$$

$$T_{s,1}^w = 0 \quad 3.17$$

Siendo $T_{s,i+1}^w$ el tiempo de salida de la estación $i + 1$ bajo el escenario con retraso w , $T_{s,i}^w$ el tiempo de salida de la estación i bajo el escenario con retraso w , $\hat{T}_{d,i}$ el tiempo de retraso borroso a la salida de la estación i , $\underline{T}_{r,i}$ el tiempo de recorrido mínimo en el trayecto i , $T_{h,i}^w$ el tiempo de holgura del trayecto i bajo el escenario con retraso w y $T_{p,i+1}^w$ el tiempo de parada en la estación $i + 1$ bajo el escenario con retraso w .

A modo explicativo, la ecuación 3.18 expresa el tiempo de recorrido de una conducción de recuperación de retraso a lo largo de un trayecto, aunque dicha ecuación no forma parte del modelo.

$$T_{r,i}^w = \underline{T}_{r,i} + T_{h,i}^w \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.18$$

Siendo $T_{r,i}^w$ el tiempo de recorrido de la conducción de recuperación de retraso bajo el escenario con retraso w , $\underline{T}_{r,i}$ el tiempo de recorrido mínimo y $T_{h,i}^w$ el tiempo de holgura o margen teórico todos bajo el escenario con retraso w , todos ellos en el

trayecto i . Este tiempo de holgura en el escenario de retraso w será menor que la holgura comercial del trayecto i ($T_{h,i}$).

Como se indicó anteriormente, cuando el tren llega con retraso a la estación i , el tiempo de parada en la misma ($T_{p,i}^w$) se reducirá respecto al tiempo de parada comercial ($T_{p,i}$). No obstante, se establecerá una cota inferior de tiempo de parada, correspondiente al tiempo mínimo necesario para la subida y bajada de viajeros en el andén. Dicha restricción se muestra en 3.19.

$$T_{p,i}^w \geq \underline{T_{p,i}} \quad \forall 1 < i \leq n \quad 3.19$$

Siendo $T_{p,i}^w$ el tiempo de parada en el escenario con retraso w y $\underline{T_{p,i}}$ el tiempo de parada mínimo admisible, ambos en la estación i .

Por tanto, el tiempo de retraso recuperado durante la parada en la estación i bajo un escenario con retraso w será igual a la diferencia entre el tiempo de parada comercial y el tiempo de parada bajo dicho escenario ($T_{p,i} - T_{p,i}^w$).

Modelo de puntualidad

El modelo de optimización establecerá los requisitos de puntualidad al igual que se hace en los servicios de *Alta Velocidad*, es decir, en las llegadas a estación. Dado que el modelo incorpora retrasos borrosos a la salida de estación, el tiempo de llegada a una estación i en un escenario con retraso w será un conjunto borroso ($\hat{T}_{u,i}^w$) que deberá ser menor que el tiempo de llegada comercial a dicha estación, según indica la ecuación 3.20.

$$\hat{T}_{u,i}^w \lesssim T_{u,i} \quad \forall 1 < i \leq n \quad 3.20$$

Siendo $\hat{T}_{u,i}^w$ el tiempo borroso de llegada a la estación i en el escenario con retraso w y $T_{u,i}$ el tiempo de llegada comercial a la estación i .

El modelo de puntualidad propuesto consiste en la exigencia de un valor mínimo de puntualidad en cada estación, expresado como una medida de necesidad de puntualidad (Np_i). La medida de necesidad de que un tren llegue puntual a la estación i será igual a la diferencia entre 1 y la posibilidad de que el tren llegue con retraso, como indica la ecuación 3.21.

$$Np_i = 1 - Pr_i \quad 3.21$$

Siendo Np_i la necesidad de puntualidad requerido en la llegada a la estación i (Figura 3-7) y Pr_i la posibilidad de retraso a la llegada a la estación i , es decir, la posibilidad de que, en un escenario con retraso w , el tiempo de llegada a la estación i sea posterior al tiempo de llegada comercial ($T_{u,i}$).

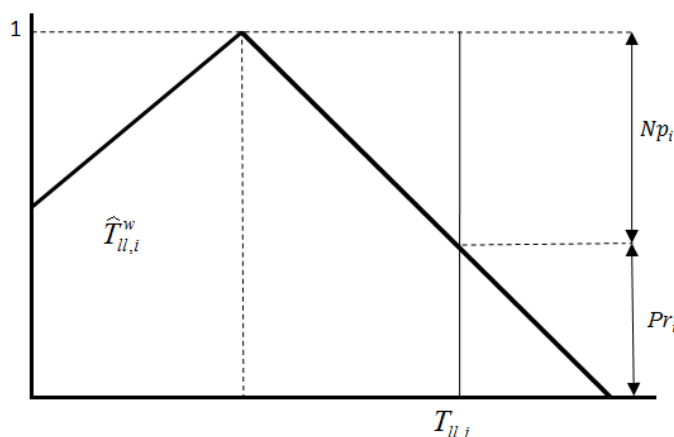


Figura 3-7. Tiempo de llegada borroso a la estación i .

La restricción de puntualidad 3.20 se puede expresar en función de los tiempos de salida de estación según la ecuación 3.22.

$$T_{s,i}^w + \hat{T}_{d,i} + (\underline{T}_{r,i} + T_{h,i}^w) \lesssim T_{s,i} + \underline{T}_{r,i} + T_{h,i} \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.22$$

Siendo $T_{s,i}^w$ el tiempo de salida de la estación i en el escenario con retraso w , $\hat{T}_{d,i}$ el tiempo de retraso borroso a la salida de la estación i , $\underline{T}_{r,i}$ el tiempo de recorrido mínimo en el trayecto i , $T_{h,i}^w$ el tiempo de holgura del trayecto i bajo el escenario con retraso w , $T_{s,i}$ el tiempo de salida comercial de la estación i y $T_{h,i}$ el tiempo de holgura comercial en el trayecto i .

Suprimiendo el tiempo de recorrido mínimo de ambos lados de la ecuación 3.22 se obtiene la ecuación 3.23, expresión general de la restricción del tiempo de llegada a estación o requisito de puntualidad en un escenario con retraso.

$$T_{s,i}^w + \hat{T}_{d,i} + T_{h,i}^w \lesssim T_{s,i} + T_{h,i} \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.23$$

Siendo $T_{s,i}^w$ el tiempo de salida de la estación i en el escenario con retraso w , $\hat{T}_{d,i}$ el tiempo de retraso borroso a la salida de la estación i , $T_{h,i}^w$ el tiempo de holgura del trayecto i bajo el escenario con retraso w , $T_{s,i}$ el tiempo de salida comercial de la estación i y $T_{h,i}$ el tiempo de holgura comercial en el trayecto i .

El modelo de programación matemática borrosa se puede expresar en términos de α -cortes de los conjuntos borrosos (Chanas, Ko Odziejczyk et al. 1984). Dado que el tiempo de llegada a estación es una función creciente con el retraso, los límites superiores de los α -cortes del tiempo de llegada a estación en un escenario con retraso w se podrán calcular a partir de los límites superiores de los α -cortes del retraso borroso. Tal como se mostró en la Figura 3-7, es necesario calcular el límite superior de los α -cortes del tiempo de llegada borroso para poder evaluar el nivel de necesidad de puntualidad en estación.

De la misma manera, la ecuación del modelo de tráfico 3.16, que expresa los tiempos de salida de estación a partir de los conjuntos borrosos de tiempos de retraso en la

estación anterior se puede expresar en términos del límite superior del α -corte del retraso borroso ($T_{d,i}^{w-\alpha}$) en la estación anterior, según las ecuaciones 3.24 y 3.25, donde el escenario de retraso w , cuyo valor de posibilidad es α , se obtendrá calculando el límite superior del α -corte del tiempo de retraso.

$$T_{s,i+1}^w = T_{s,i}^w + T_{d,i}^{w-\alpha} + \left(\underline{T}_{r,i} + T_{h,i}^w \right) + T_{p,i+1}^w \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.24$$

$$T_{s,1}^w = 0 \quad 3.25$$

Siendo $T_{s,i+1}^w$ el tiempo de salida de la estación $i + 1$ bajo el escenario con retraso w , $T_{s,i}^w$ el tiempo de salida de la estación i bajo el escenario con retraso w , $T_{d,i}^{w-\alpha}$ el límite superior del α -corte del tiempo de retraso en la estación i bajo el escenario con retraso w , $\underline{T}_{r,i}$ el tiempo de recorrido mínimo en el trayecto i , $T_{h,i}^w$ el tiempo de holgura del trayecto i bajo el escenario con retraso w y $T_{p,i+1}^w$ el tiempo de parada en la estación $i + 1$ bajo el escenario con retraso w .

El valor del límite superior del α -corte del tiempo de retraso en cada estación i se calculará mediante la ecuación 3.26.

$$T_{d,i}^{w-\alpha} = b_i - (b_i - a_i) \cdot \alpha^w \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.26$$

Siendo $T_{d,i}^{w-\alpha}$ el límite superior del α -corte del tiempo de retraso en la estación i en el escenario con retraso w , b_i el parámetro que define el máximo tiempo de retraso posible a la salida de la estación i , a_i el parámetro que define el núcleo del tiempo de retraso borroso a la salida de la estación i y α^w la posibilidad del escenario de retraso w .

Así mismo, para evitar que el tiempo de salida de estación sea anterior al tiempo de salida comercial será necesario añadir la restricción adicional 3.27. Por otro lado, en un escenario de retraso, las restricciones de puntualidad forzarán que la salida del tren se produzca lo antes posible.

$$T_{s,i} \leq T_{s,i}^w \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.27$$

Siendo $T_{s,i}$ el tiempo de salida comercial y $T_{s,i}^w$ el tiempo de salida bajo el escenario con retraso w , ambos de la estación i .

Así mismo, la ecuación 3.28 se usa para determinar si el tren llega puntual a estación en función los α -cortes.

$$T_{s,i}^w + T_{d,i}^{w-\alpha} + T_{h,i}^w \leq T_{s,i} + T_{h,i} + \delta_{i+1}^w \cdot m \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.28$$

Siendo $T_{s,i}^w$ el tiempo de salida de la estación i bajo el escenario con retraso w , $T_{d,i}^{w-\alpha}$ el límite superior del α -corte del tiempo de retraso en la estación i bajo el escenario con retraso w , $T_{h,i}^w$ el tiempo de holgura del trayecto i bajo el escenario con retraso w , $T_{s,i}$ el tiempo de salida comercial de la estación i , $T_{h,i}$ el tiempo de holgura o margen

teórico comercial en el trayecto i y m un número suficientemente grande. La variable binaria δ_{i+1}^w tomará el valor 1 si el tren llega con retraso a la estación $i + 1$ en el escenario w , y 0 en caso contrario.

La expresión de δ_{i+1}^w se define en la ecuación 3.29.

$$\delta_{i+1}^w = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{ll,i+1}^w > T_{ll,i+1} \\ 0 & \text{si } T_{ll,i+1}^w \leq T_{ll,i+1} \end{cases} \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.29$$

Siendo δ_{i+1}^w una variable binaria cuyo valor será 1 si el tren llega con retraso a la estación $i + 1$ en el escenario w , $T_{ll,i+1}^w$ el tiempo de llegada a la estación $i + 1$ bajo el escenario con retraso w y $T_{ll,i+1}$ el tiempo de llegada comercial a la estación $i + 1$.

La posibilidad de que en un escenario con retraso w , un tren llegue con retraso a la estación i será igual al producto entre la variable binaria δ_i^w y la posibilidad de que se produzca dicho escenario (α^w). De esta manera, el requisito de puntualidad a la llegada de una estación i se podrá expresar mediante la ecuación 3.30.

$$\delta_i^w \cdot \alpha^w \leq 1 - Np_i \quad \forall 1 < i \leq n \quad 3.30$$

Siendo Np_i la necesidad de puntualidad a la llegada requerida en la estación i .

Modelo de consumo

Una vez definidas las restricciones del modelo de programación matemática borroso relacionadas con el tráfico y la puntualidad, se detallarán a continuación las ecuaciones del mismo para el cálculo del consumo.

El consumo de la conducción realizada en cada trayecto será función del tiempo de recorrido, o lo que es lo mismo, del tiempo de holgura del trayecto. Esta función vendrá definida por la curva de Pareto calculada previamente mediante el *Algoritmo Evolutivo* basado en simulación detallado en el capítulo 2, donde la curva de Pareto del trayecto i representará el consumo óptimo para cada tiempo de recorrido, tal como muestra la Figura 3-8.

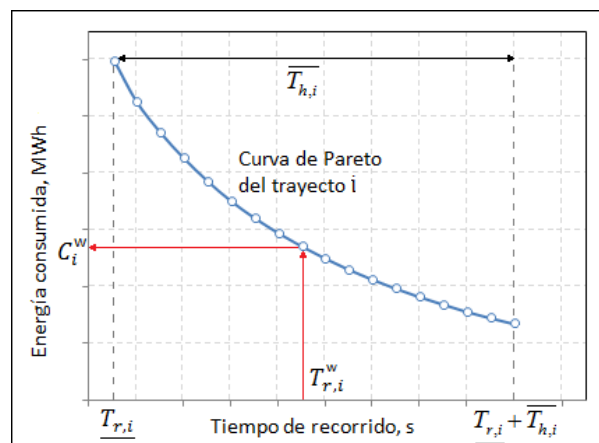


Figura 3-8. Consumo energético óptimo asociado al tiempo de recorrido de una conducción, localizado en la curva de Pareto del trayecto i .

De forma equivalente, el consumo se puede expresar en función del tiempo de holgura en el recorrido. Para calcularlo será por tanto necesario introducir en el modelo de optimización la curva de Pareto de cada uno de los $n - 1$ trayectos del servicio. Para ello, cada curva será modelada mediante un conjunto de segmentos j que formarán una poligonal convexa, siendo el inicio del primer segmento el tiempo de recorrido mínimo del trayecto y el final del último segmento el tiempo de recorrido máximo (Figura 3-8). La expresión general del consumo de la conducción nominal asociada al tiempo de recorrido comercial, suponiendo que dicho tiempo de recorrido pertenece al segmento j de la curva de Pareto del trayecto considerado, será la indicada en la ecuación 3.31.

$$C_i = a_{i,j} \cdot (\underline{T}_{r,i} + T_{h,i}) + b_{i,j} \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.31$$

Siendo C_i el consumo energético de la conducción nominal en el trayecto i , $a_{i,j}$ la pendiente del segmento j de la curva de Pareto del trayecto i , $\underline{T}_{r,i}$ el tiempo de recorrido mínimo, $T_{h,i}$ el tiempo de holgura o margen teórico comercial, ambos en el trayecto i y $b_{i,j}$ la ordenada en el origen del segmento j de la curva de Pareto del trayecto i .

Función objetivo

Retomando la función objetivo del modelo, la aproximación clásica a este problema sería la minimización del consumo asociado al horario teórico a diseñar (optimizando los tiempos de holgura en cada trayecto), considerando la definición de consumos de la ecuación 3.31.

Al introducir en el modelo los retrasos borrosos, la función objetivo se expresará mediante una meta borrosa \hat{Z} . La función objetivo que se propondrá (ecuación 3.32) tratará de minimizar el consumo total del servicio bajo un escenario $w0$ (\hat{C}_{total}^{w0}), es decir, se minimizará el consumo considerando un escenario de retraso en lugar del consumo asociado al horario teórico.

$$\hat{C}_{total}^{w0} \lesssim \hat{Z} \quad 3.32$$

Siendo \hat{Z} el objetivo borroso triangular. La función de pertenencia del conjunto borroso $\mu_{\hat{Z}}$ se muestra en la ecuación 3.33.

$$\mu_{\hat{Z}}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x < a_z \\ \frac{b_z - x}{b_z - a_z} & \text{si } a_z \leq x \leq b_z \\ 0 & \text{si } x > b_z \end{cases} \quad 3.33$$

Siendo b_z el valor máximo y a_z el núcleo del objetivo borroso \hat{Z} .

Como se puede observar en las funciones de pertenencia de la Figura 3-9, para calcular la posibilidad de que el consumo total del servicio sea menor que el objetivo

borroso se ha de calcular el límite superior de los diferentes α -cortes de dicho objetivo, así como el límite inferior de los α -cortes del consumo total en el escenario de retraso.

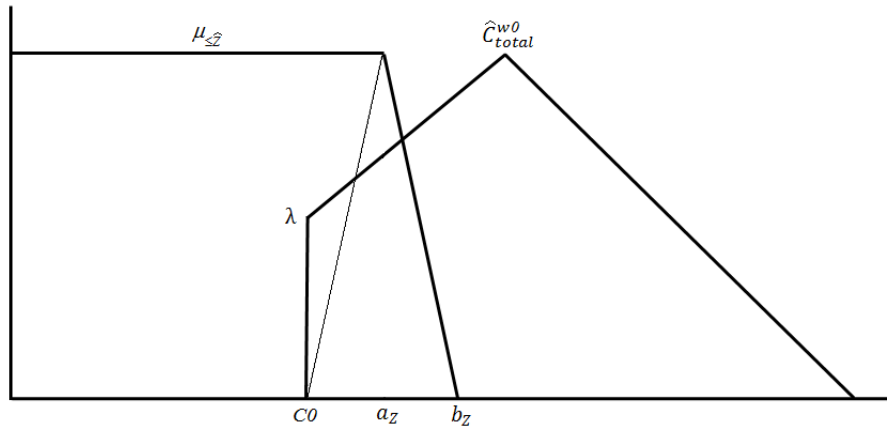


Figura 3-9. Objetivo borroso \hat{Z} y consumo total del servicio \hat{C}_{total}^{w0} bajo el escenario $w0$.

El límite superior del α -corte del objetivo borroso \hat{Z} se calculará mediante la ecuación 3.34.

$$Z^{w0-\alpha} = b_z - \alpha^{w0} \cdot (b_z - a_z) \quad 3.34$$

Siendo $Z^{w0-\alpha}$ el límite superior del α -corte del objetivo borroso, b_z el valor máximo del objetivo borroso \hat{Z} , a_z el núcleo del objetivo borroso \hat{Z} y α^{w0} la posibilidad de que se produzca el escenario de retraso $w0$.

La función para calcular el consumo energético borroso global del servicio se obtendrá mediante la aplicación del principio de extensión y los operadores Max y Min, según muestra la ecuación 3.35.

$$\mu_{C_{total}}(c) = \sup_{C_{total}=f(T_{d,i})} \min(\mu_{T_{d,i}}(T_{d,i})) \quad 3.35$$

Dado que el consumo crece con el aumento del retraso, ya que a mayores tiempos de retraso más rápidas deberán ser las conducciones de recuperación, el principio de extensión se podrá expresar en términos del cálculo de intervalos para diferentes α -cortes de retrasos borrosos. Para comparar y calcular la posibilidad de que el consumo energético borroso total del servicio sea inferior al objetivo borroso se deben calcular los límites inferiores de los α -cortes del consumo, que a su vez se deben expresar en función del límite inferior de los α -cortes del retraso borroso.

El valor del límite inferior del α -corte del retraso borroso viene dado por la ecuación 3.36.

$$T_{d,i}^{w-\alpha} = (\alpha^{w0} - \lambda_i) \cdot \frac{a_i}{1 - \lambda_i} \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.36$$

Siendo $T_{a,i}^{w0-\alpha}$ el límite inferior del α -corte del tiempo de retraso borroso en el trayecto i bajo el escenario con retraso $w0$, α^{w0} la posibilidad de que se produzca el escenario de retraso $w0$, λ_i la posibilidad de que el tren salga puntual de la estación i y a_i el núcleo del retraso borroso de la estación i .

Si la solución es factible dadas las restricciones de puntualidad particularizadas para los límites superiores de los α -cortes de los retrasos, el escenario analizado para el consumo (límites inferiores del α -corte del retraso) también será puntual, ya que su retraso será menor.

Bajo un escenario con retraso, en el modelo más básico, se asumiría que la nueva conducción con la que se ejecuta el nuevo tiempo de recorrido se encontrará también en la curva de Pareto. Por tanto, la expresión general del consumo energético de la conducción de recuperación de retraso, suponiendo que su tiempo de recorrido pertenece al segmento j de la curva de Pareto del trayecto considerado, será la indicada en la ecuación 3.37.

$$C_i^{w0} = a_{i,j} \cdot (\underline{T_{r,i}} + T_{h,i}^{w0}) + b_{i,j} \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.37$$

Siendo C_i^{w0} el consumo energético de la conducción de recuperación de retraso bajo el escenario con retraso $w0$ en el trayecto i , $a_{i,j}$ la pendiente del segmento j de la curva de Pareto del trayecto i , $\underline{T_{r,i}}$ el tiempo de recorrido mínimo del trayecto i , $T_{h,i}^{w0}$ el tiempo de holgura del trayecto i bajo el escenario de retraso $w0$, y $b_{i,j}$ la ordenada en el origen del segmento j de la curva de Pareto del trayecto i .

Respuesta conductual borrosa

La respuesta conductual borrosa descrita en (Carey 1998) describe el fenómeno observado de que cuanto más tiempo se concede a una actividad, mayor es el tiempo que lleva realizarla, y por tanto este comportamiento debe ser tenido en cuenta en el modelo de optimización. El modelo de respuesta conductual propuesto en esta tesis se refiere al comportamiento del maquinista según el retraso del tren a la salida de estación.

En la definición del consumo energético asociado a una conducción de recuperación de retraso bajo un escenario con retraso mostrada en la ecuación 3.37 se supuso que dicho consumo estaría localizado sobre la curva de Pareto para el tiempo de recorrido correspondiente. No obstante, cuando un maquinista tiene que recuperar un retraso, normalmente lo hace de la forma más rápida posible y no de la más eficiente. Para ello, al salir con retraso de una estación, el maquinista suele iniciar una conducción a marcha tendida hasta que recupera la totalidad del retraso, para después continuar con la conducción nominal. Este comportamiento se muestra en la Figura 3-10, donde la primera gráfica muestra el perfil de velocidad de una conducción nominal hipotética en el trayecto Madrid-Calatayud, y las dos siguientes muestran dos conducciones de recuperación de retraso típicas, la primera para un tiempo de retraso a la salida de 30s y la segunda para uno de 90s.

Como se indicó en el capítulo 2, la conducción a marcha tendida dista de ser una conducción eficiente, de manera que el consumo energético asociado a este tipo de conducciones de recuperación será mayor que el consumo energético óptimo para el mismo tiempo de recorrido, localizado en la curva de Pareto del trayecto.

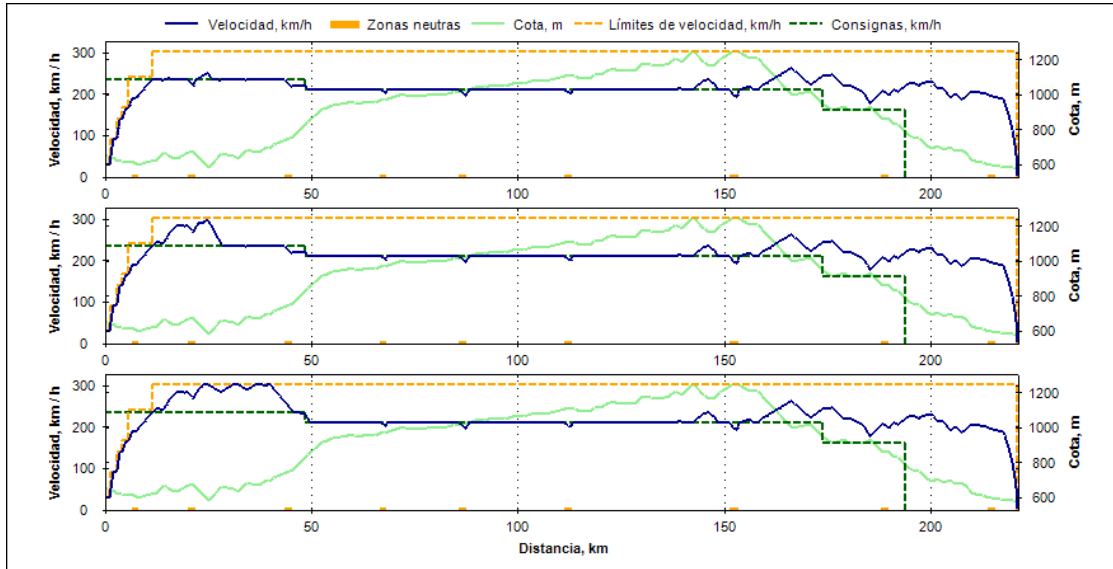


Figura 3-10. Conducción nominal y conducciones de recuperación de retraso de 30 s y 90 s en el trayecto Madrid-Calatayud.

Este comportamiento del maquinista se incluirá en la función objetivo del modelo de optimización. Por tanto, para modelar el consumo energético asociado a la conducción de recuperación de retraso a lo largo de un trayecto, se añadirá en la ecuación 3.37 un término creciente con el tiempo de retraso recuperado en el mismo ($T_{h,i} - T_{h,i}^{w0}$), dando lugar a la ecuación 3.38.

$$C_i^{w0} = a_{i,j} \cdot (T_{r,i} + T_{h,i}^{w0}) + b_{i,j} + f(T_{h,i} - T_{h,i}^{w0}) \quad \forall 1 \leq i < n, \forall j \quad 3.38$$

Siendo C_i^{w0} el consumo energético de la conducción de recuperación de retraso bajo el escenario con retraso $w0$ en el trayecto i , $a_{i,j}$ la pendiente del segmento j de la curva de Pareto del trayecto i , $T_{r,i}$ el tiempo de recorrido mínimo del trayecto i , $T_{h,i}^{w0}$ el tiempo de holgura del trayecto i bajo el escenario de retraso $w0$, $b_{i,j}$ la ordenada en el origen del segmento j de la curva de Pareto del trayecto i y $f(T_{h,i} - T_{h,i}^{w0})$ la función de incremento de consumo respecto a la conducción óptima para el mismo tiempo de recorrido en el trayecto i , que dependerá del retraso recuperado durante el mismo ($T_{h,i} - T_{h,i}^{w0}$).

Dicho escenario será forzado a ser puntual mediante la ecuación 3.39.

$$\delta_i^{w0} \cdot \alpha^{w0} = 0 \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.39$$

Siendo δ_i^{w0} una variable binaria cuyo valor será 1 cuando el tren llegue con retraso a la estación i en el escenario con retraso $w0$, y 0 en otro caso, y α^{w0} la posibilidad de que se produzca el escenario con retraso $w0$.

Las conducciones de recuperación de retraso han sido simuladas para diferentes valores de retraso recuperado con el fin de modelar la función f de incremento de consumo respecto a la conducción óptima. Como resultado de dichas simulaciones, se ha observado que el comportamiento del maquinista al tratar de recuperar el retraso lo antes posible se puede modelar como una función proporcional al tiempo de retraso recuperado, cuya constante de proporcionalidad será K (Figura 3-11). Este comportamiento incrementará el consumo de recuperación de retraso por encima de la conducción óptima para ese tiempo de recorrido, que estará localizado sobre la curva de Pareto. El modelo que se adoptará será el indicado en la ecuación 3.40.

$$f(T_{h,i} - T_{h,i}^{w0}) = K_i \cdot (T_{h,i} - T_{h,i}^{w0}) \quad \forall 1 \leq i < n, K_i > 0 \quad 3.40$$

Siendo $f(T_{h,i} - T_{h,i}^{w0})$ la función de incremento de consumo de la conducción de recuperación de retraso respecto a la conducción óptima para el mismo tiempo de recorrido en el trayecto i , K_i la constante de proporcionalidad de la función de incremento de consumo en el trayecto i y $(T_{h,i} - T_{h,i}^{w0})$ el retraso recuperado durante el trayecto i bajo el escenario con retraso $w0$.

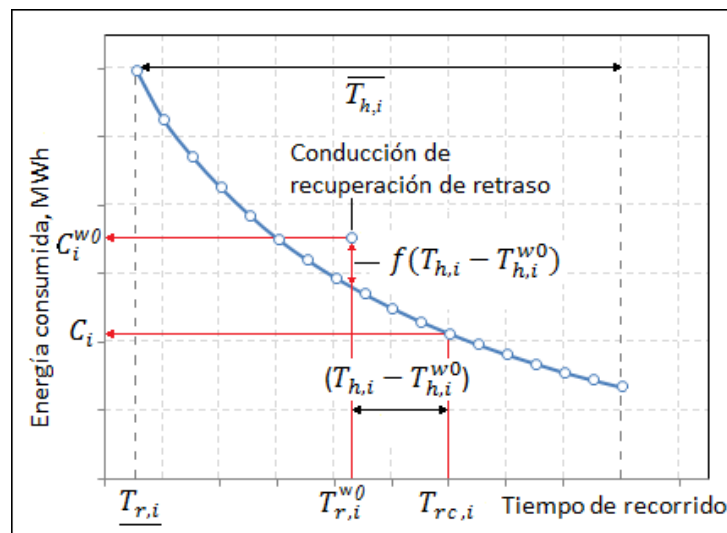


Figura 3-11. Incremento de consumo energético en la conducción con recuperación de retraso.

A pesar de que los maquinistas suelen realizar las conducciones de recuperación de retraso de forma similar, se modelará la constante de proporcionalidad de la función de incremento de consumo como otro número borroso \tilde{K}_i , añadiendo al modelo una fuente de incertidumbre adicional. La Figura 3-12 muestra la función de pertenencia de dicho número borroso, donde el valor máximo indicará la situación correspondiente a recuperar el retraso lo antes posible ($K_{b,i}$), al que se le asignará la máxima posibilidad, y el valor mínimo será cero, que indicará la situación en que la conducción de recuperación de retraso estará localizada en la curva de Pareto para el tiempo de recorrido correspondiente, al que se le asignará una posibilidad nula.

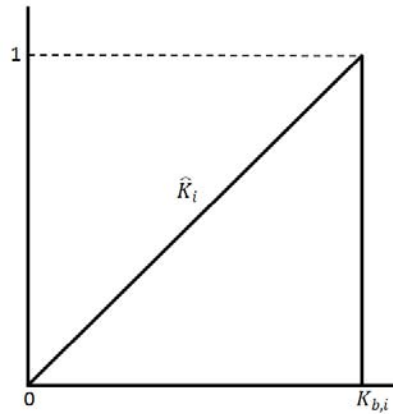


Figura 3-12. Parámetro borroso \widehat{K}_i para modelar el incremento energético de conducciones de recuperación de retraso.

En la práctica, el valor con el que operará el modelo será el límite inferior del α -corte de la constante de proporcionalidad borrosa, indicado en la ecuación 3.41.

$$K_i^{w0-\alpha l} = \alpha^{w0} \cdot K_{b,i} \quad \forall 1 \leq i < n \quad 3.41$$

Siendo $K_i^{w0-\alpha l}$ el límite inferior del α -corte de la constante de proporcionalidad borrosa, α^w la posibilidad de que se produzca el escenario $w0$ y $K_{b,i}$ el valor máximo de la constante de proporcionalidad borrosa que modela el incremento energético de las conducciones con recuperación de retraso en el trayecto i .

La ecuación 3.38 para determinar el consumo energético de una conducción con recuperación de retraso será evaluada en la práctica con la ecuación 3.42, que incluye el límite inferior del α -corte de la constante de proporcionalidad borrosa que modela el incremento energético de las conducciones con recuperación de retraso.

$$C_i^{w0} = a_{i,j} \cdot (T_{r,i} + T_{h,i}^{w0}) + b_{i,j} + K_i^{w0-\alpha l} \cdot (T_{h,i} - T_{h,i}^{w0}) \quad \forall 1 \leq i < n, \forall j \quad 3.42$$

Siendo C_i^{w0} el consumo energético de la conducción de recuperación de retraso bajo el escenario con retraso $w0$ en el trayecto i , $a_{i,j}$ la pendiente del segmento j de la curva de Pareto del trayecto i , $T_{r,i}$ el tiempo de recorrido mínimo del trayecto i , $T_{h,i}^{w0}$ el tiempo de holgura del trayecto i bajo el escenario de retraso $w0$, $b_{i,j}$ la ordenada en el origen del segmento j de la curva de Pareto del trayecto i , $K_i^{w0-\alpha l}$ el límite inferior del α -corte de la constante de proporcionalidad borrosa, α^{w0} la posibilidad de que se produzca el escenario $w0$ y $(T_{h,i} - T_{h,i}^{w0})$ el retraso recuperado en el trayecto i bajo el escenario con retraso $w0$.

La solución final del modelo de optimización lineal borroso se obtendrá mediante un proceso iterativo, donde en cada iteración se incrementará el valor de α con el fin de hallar el valor máximo que satisfaga la función objetivo borrosa de la ecuación 3.43 y las restricciones descritas anteriormente.

$$C_i^{w0} \leq Z_i^{w0-\alpha} \quad 3.43$$

Siendo C_i^{w0} el consumo energético de la conducción de recuperación de retraso bajo el escenario con retraso $w0$ en el trayecto i y $Z_i^{w0-\alpha}$ el límite superior del α -corte del objetivo borroso \hat{Z} .

3.3. CASO EJEMPLO Y RESULTADOS

A continuación se mostrará un caso de optimización del horario comercial de un servicio real en operación con el objetivo de ilustrar el ahorro potencial que se puede conseguir aplicando el procedimiento detallado en el capítulo. El servicio elegido es el 3113, con inicio en Madrid Puerta de Atocha, final en Barcelona Sants y paradas intermedias en Calatayud, Zaragoza Delicias, Lleida-Pirineus y Camp de Tarragona, totalizando seis estaciones, cinco trayectos ($n = 6$), y con una longitud de 628 km.

Se eligió este servicio por ser operado con el tren Talgo-Bombardier S-102 para el que se ajustó el simulador en el capítulo anterior. La Figura 3-13 muestra el horario vigente del servicio.

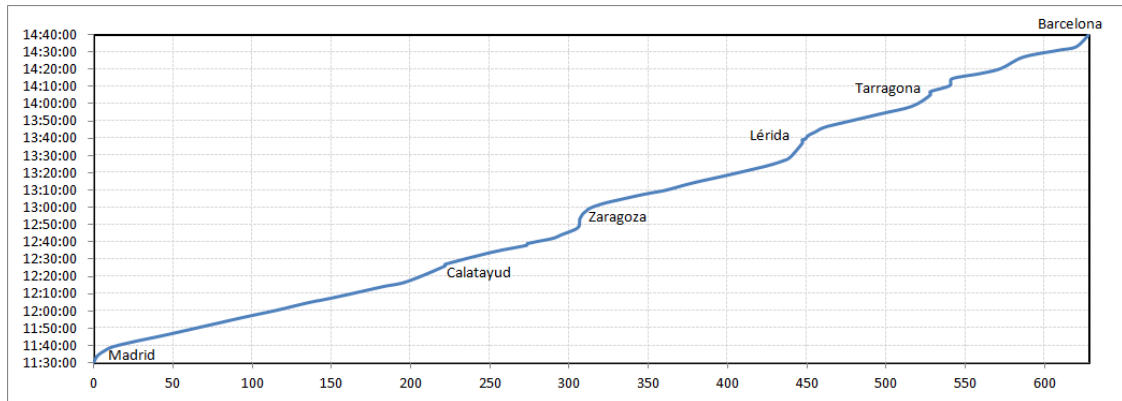


Figura 3-13. Malla horaria del servicio 3113 Madrid-Calatayud-Zaragoza-Lérida-Tarragona-Barcelona.

Tras la elección del servicio se procedió a recopilar los datos de entrada necesarios para ejecutar el modelo de optimización. En primer lugar se establecieron las siguientes restricciones operativas con el fin de no afectar a los servicios adyacentes:

- Mantenimiento de la hora de salida desde Madrid Puerta de Atocha ($T_{d,1}$) y la hora de llegada a Barcelona Sants ($T_{l,6}$), señaladas en negrita en la Tabla 3-1.

Estación	i	Hora de salida $T_{s,i}$ (hh:mm:ss)	Hora de llegada $T_{l,i}$ (hh:mm:ss)
Madrid Puerta de Atocha	1	11:30:00	-
Calatayud	2	12:28:00	12:27:00
Zaragoza Delicias	3	12:55:00	12:54:00
Lleida Pirineus	4	13:40:00	13:38:00
Tarragona	5	14:11:00	14:09:00
Barcelona Sants	6	-	14:48:00

Tabla 3-1. Horario comercial del servicio 3113 entre Madrid y Barcelona.

De esta manera queda fijado el tiempo de recorrido comercial total del servicio ($T_{rc,total}$), igual a la diferencia entre el tiempo de llegada a Barcelona Sants ($T_{ll,6}$) y el tiempo de salida de Madrid Puerta de Atocha ($T_{s,1}$) según muestra la ecuación 3.44.

$$T_{rc,total} = T_{ll,6} - T_{s,1} = 3:18:00 = 11880 \text{ s} \quad 3.44$$

- Mantenimiento de los tiempos de parada comercial en estación ($T_{p,i}$), indicados en la Tabla 3-2. De esta manera, el tiempo de parada total del horario a optimizar tendrá un valor de $T_{p,total} = 360 \text{ s}$, que equivale a un 3% del tiempo de recorrido comercial total del servicio ($T_{rc,total}$).

Estación	i	Tiempo de parada $T_{p,i}$ (s)
Calatayud	2	60
Zaragoza Delicias	3	60
Lleida Pirineus	4	120
Tarragona	5	120
Total		360

Tabla 3-2. Tiempos de parada comercial en estación del servicio 3113.

A continuación se halló el tiempo de recorrido mínimo en cada trayecto ($T_{r,i}$) mediante una simulación a marcha tendida, y con él el tiempo de holgura vigente de cada uno de ellos aplicando la ecuación 3.45. La Tabla 3-3 muestra los valores correspondientes, además del porcentaje de tiempo de holgura sobre el tiempo de recorrido comercial vigente de cada trayecto.

$$T_{h,i} = T_{rc,i} - T_{r,i} \quad \forall 1 \leq i < 6 \quad 3.45$$

Trayecto	i	Tiempo de recorrido mínimo $T_{r,i}$ (s)	Tiempo de holgura vigente $T_{h,i}$ (s)	Tiempo de recorrido comercial vigente $T_{rc,i}$ (s)	Tiempo de holgura vigente (%)
Madrid – Calatayud	1	3145	275	3420	8,04%
Calatayud – Zaragoza Delicias	2	1346	214	1560	13,72%
Zaragoza Delicias – Lleida	3	2053	527	2580	20,43%
Lleida – Tarragona	4	1166	574	1740	32,99%
Tarragona – Barcelona Sants	5	1653	567	2220	25,54%
Total		9363	2157	11520	18,72%

Tabla 3-3. Tiempos de recorrido mínimo, comercial y máximo del servicio 3113 entre Madrid y Barcelona.

Dado que el tiempo de parada en estaciones intermedias ($T_{p,i}$) y el tiempo total de recorrido comercial (T_{rc}) se mantuvo, también lo hizo el tiempo de holgura total del servicio ($T_{h,total}$), hallado con la ecuación 3.46. El modelo de optimización redistribuirá dicho tiempo de forma que se minimice el consumo energético global del servicio y se cumplan con los requisitos de puntualidad a la llegada en cada estación.

$$T_{h,total} = \sum_{i=1}^5 T_{h,i} = 0:35:57 = 2157 \text{ s} \quad 3.46$$

Seguidamente se calcularon las curvas de Pareto de cada uno de los cinco trayectos. Para ello se aplicó sucesivamente, para cada trayecto, el algoritmo de optimización descrito en el capítulo 2, variando el tiempo objetivo (T_{obj}) entre el tiempo de recorrido mínimo ($T_{r,i}$) y el máximo ($T_{r,i} + \overline{T_{h,l}}$) para cada trayecto i .

Una vez obtenidas las cinco curvas de Pareto, se ajustó cada una de ellas a un conjunto de segmentos definidos por los parámetros $a_{i,j}$ y $b_{i,j}$ tal y como se detalló en la descripción del modelo. La Tabla 3-4 muestra dichos parámetros.

Trayecto	i	$a_{i,1}$	$a_{i,2}$	$a_{i,3}$	$b_{i,1}$	$b_{i,2}$	$b_{i,3}$
Madrid – Calatayud	1	-5,03	-2,26	-1,55	20082,1	11305,4	8910,1
Calatayud – Zaragoza Delicias	2	-5,20	-1,70	-1,09	8133,4	3475,9	2571,2
Zaragoza Delicias – Lleida	3	-2,57	-1,38	-0,93	8141,8	5395,6	4250,8
Lleida – Tarragona	4	-5,24	-1,65	-0,92	8476,1	3633,4	2562,4
Tarragona – Barcelona Sants	5	-2,38	-1,35	0,92	5707,6	3868,2	3036,9

Tabla 3-4. Coeficientes de los modelos de las curvas de Pareto de los trayectos del servicio 3113.

Por otro lado se establecieron los requisitos de puntualidad a la llegada (Np_i), mostrados en la Tabla 3-5. Dado que Barcelona Sants es la estación de destino de la mayor parte de los pasajeros de este servicio, es allí donde se exigió un mayor requisito de puntualidad, seguido de Zaragoza Delicias. Al resto de estaciones no se les exigió un requisito de puntualidad elevado.

Estación	i	Requisito de puntualidad a la llegada Np_i
Madrid Puerta de Atocha	1	-
Calatayud	2	0,1
Zaragoza Delicias	3	0,6
Lleida Pirineus	4	0,2
Tarragona	5	0,2
Barcelona Sants	6	0,9

Tabla 3-5. Requisitos de puntualidad a la llegada de las estaciones del servicio 3113.

La Tabla 3-6 muestra los parámetros que se utilizaron para modelar el retraso borroso a la salida de cada estación ($\hat{T}_{d,i}$). A pesar de tener todos ellos el mismo núcleo, se asignó un valor mayor de retraso máximo a las estaciones de Madrid y Zaragoza por ser las estaciones donde se produce un mayor tráfico de viajeros, principal motivo causante de retrasos.

Estación	i	Posibilidad de retraso nulo λ_i	Núcleo del retraso a_i , (s)	Máximo retraso a la salida b_i , (s)
Madrid Puerta de Atocha	1	0,2	60	600
Calatayud	2	0,2	60	360
Zaragoza Delicias	3	0,2	60	600
Lleida Pirineus	4	0,2	60	240
Tarragona	5	0,2	60	240

Tabla 3-6. Parámetros del retraso borroso $\tilde{T}_{d,i}$ a la salida de cada estación del servicio 3113.

Al definir el objetivo borroso \hat{Z} con la ecuación 3.32, fue necesario definir los parámetros correspondientes a_z y b_z . El parámetro a_z se calculó resolviendo el problema de optimización sin retrasos ni restricciones de puntualidad, obteniendo un consumo mínimo del horario $a_z = 7473 kWh$. Por otro lado, para asignar un valor al parámetro b_z se evaluó un escenario pesimista w correspondiente al máximo retraso en cada estación, obteniendo una solución de $b_z = 7860 kWh$. La función de pertenencia de dicho objetivo borroso se muestra en la Figura 3-14.

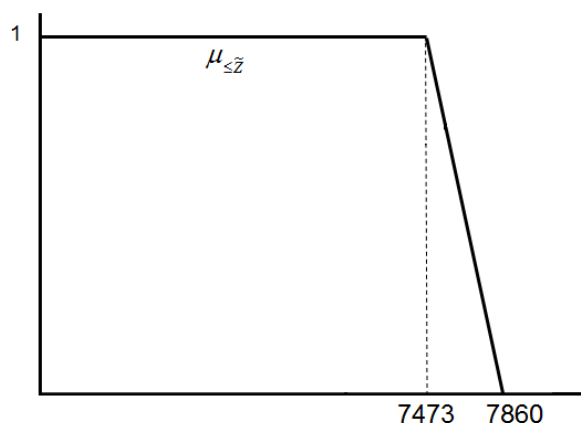


Figura 3-14. Objetivo borroso del modelo de optimización para el servicio 3113.

Se evaluaron cuatro escenarios diferentes w en cuanto a las restricciones de puntualidad, uno para cada nivel de necesidad de puntualidad a la llegada a la estación i , Np_i . El escenario de retraso base w_0 fue evaluado iterativamente para valores crecientes de α (límites inferiores de los α -cortes del consumo en el escenario con retraso) con el fin de hallar el valor máximo que satisficiera el objetivo borroso.

Una vez introducidos los datos de entrada anteriores en el modelo, se procedió a ejecutar el modelo de optimización, obteniendo los valores de los nuevos tiempos de holgura $T_{h,i}$ de cada trayecto que permiten calcular los tiempos de recorrido comercial y consumos energéticos tanto del escenario nominal como de los escenarios retrasados.

El valor resultante de α que satisfizo tanto las restricciones de puntualidad como el objetivo borroso fue 0,6. El valor del límite inferior del α -corte del tiempo de retraso correspondiente fue $T_{d,i}^{w-\alpha l} = 30 s, i = 1, \dots, 5$, que sería el escenario de retraso base para la evaluación de la función objetivo.

La Tabla 3-8 muestra los consumos resultantes para dicho escenario de retraso con los valores de los límites inferiores del α -corte de \hat{K}_i que indica la Tabla 3-7 (para $\alpha=0.6$).

Estación	i	\hat{R}_i
Madrid Puerta de Atocha	1	0,15
Calatayud	2	0,55
Zaragoza Delicias	3	0,77
Lleida Pirineus	4	0,45
Tarragona	5	0,90

Tabla 3-7. Límite superior del parámetro borroso de incremento de consumo por recuperación de retraso en el servicio 3113.

La Tabla 3-8 muestra los resultados obtenidos, donde la columna “energía consumida” se refiere al consumo de la conducción óptima para el tiempo de recorrido comercial correspondiente, y la columna “energía consumida, escenario retraso 30 s” se refiere al consumo de la conducción de recuperación ante un retraso de 30 s a la salida de la estación, correspondiente al escenario evaluado en la función objetivo.

Trayecto	i	Horario comercial optimizado			Horario comercial en servicio		
		Tiempo de holgura $T_{h,i}$ (s)	Energía consumida C_i (kWh)	Energía consumida escenario retraso 30 s C_i^{w0} (kWh)	Tiempo de holgura $T_{h,i}$ (s)	Energía consumida C_i (kWh)	Energía consumida escenario retraso 30 s C_i^{w0} (kWh)
Madrid-Calatayud	1	863	2487,8	2499,9	275	3372,0	3468,9
Calatayud-Zaragoza	2	240	907,5	951,3	214	931,2	986,0
Zaragoza Delicias - Lleida	3	168	2160,1	2221,6	527	1700,3	1777,1
Lleida - Tarragona	4	96	1354,9	1391,2	574	994,4	1039,6
Tarragona – Barcelona	5	790	722,9	795,2	567	1058,7	1149,1
Total		2157	7633,3	7859,2	2157	8056,6	8420,7

Tabla 3-8. Tiempos de holgura óptimos para el servicio 3113.

El consumo energético global del horario comercial optimizado es de 7633,3 kWh, un 5,25% menor que el correspondiente al horario comercial vigente suponiendo conducción eficiente. Además, el consumo energético global del escenario de retraso base es de 7859,2 kWh, un 6,67 % menor que el correspondiente al horario comercial vigente (Tabla 3-9).

Escenario	Consumo del horario comercial en servicio (kWh)	Consumo del horario comercial optimizado (kWh)	Ahorro energético (%)
C	8056,6	7633,3	5,25%
C0	8420,7	7859,2	6,67%

Tabla 3-9. Consumo global del horario optimizado y ahorro respecto al horario actual en servicio.

Como ejemplo, se muestra en la Figura 3-15 el perfil de velocidad correspondiente a la conducción óptima diseñada en el trayecto Madrid-Calatayud, que consistió en tres tramos de regulación de velocidad sin freno y un tramo de deriva final. Por otro lado, la Figura 3-16 muestra el perfil de velocidad de la conducción de recuperación de retraso para el escenario de retraso base de 30s a la salida de Madrid, en la que una vez recuperado el retraso se vuelve a aplicar la conducción nominal.

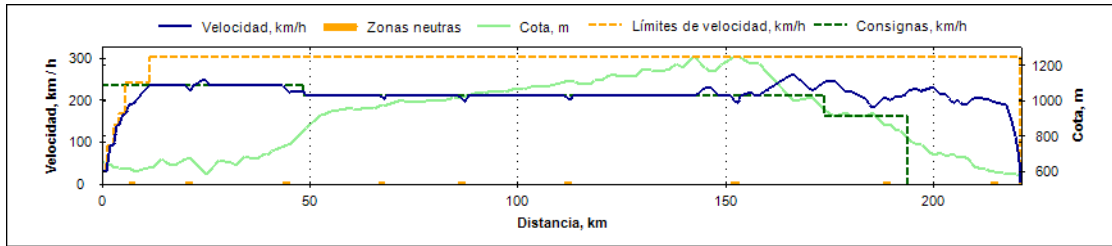


Figura 3-15. Conducción óptima Madrid-Calatayud para el tiempo de recorrido comercial diseñado servicio 3113.

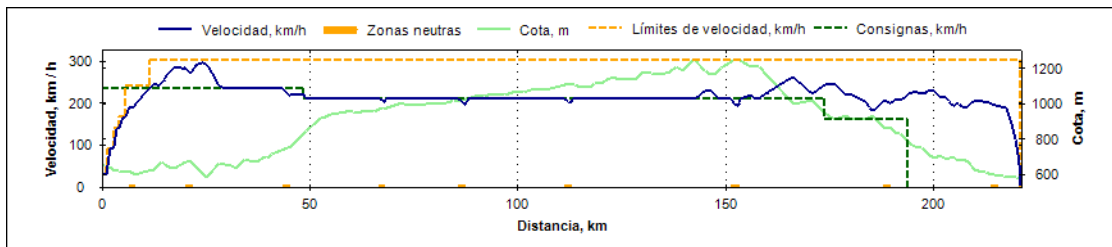


Figura 3-16. Conducción de recuperación de retraso de 30 s en el trayecto Madrid-Calatayud en el servicio 3113.

Es importante señalar que los ahorros obtenidos son debidos únicamente a la distribución óptima del tiempo de holgura total del servicio ($T_{h,total}$), y no a la aplicación de conducciones manuales eficientes ya que se ha comparado el horario actualmente en servicio con el optimizado, considerado en ambos conducciones localizadas en la curva de Pareto de cada trayecto. Los ahorros asociados a la conducción eficiente y los asociados a la distribución óptima de holguras de tiempo son complementarios, y deben ser utilizados de manera conjunta para garantizar un consumo óptimo de un servicio comercial.

3.4. RESUMEN, CONCLUSIONES Y APORTACIONES

En este capítulo se ha propuesto un modelo de optimización de horarios de servicios comerciales de *Alta Velocidad* bajo incertidumbre, cuyo objetivo es la minimización del consumo energético global del servicio imponiendo requisitos de puntualidad en cada una de sus paradas.

Se ha propuesto un modelo de diseño conjunto para obtener tanto el horario óptimo como la conducción óptima a implementar en cada uno de los trayectos que componen un servicio comercial. Este enfoque conjunto tiende a asignar mayores holguras de tiempo a los trayectos en los que la conducción económica es más eficiente, maximizando el ahorro total por conducción y por horario.

Para modelar la incertidumbre asociada a los retrasos producidos durante la explotación de un servicio comercial se ha propuesto un modelo original de programación matemática borrosa, que considera los retrasos como números borrosos originados en la salida de cada estación del servicio, lo que requiere un modelo borroso tanto de las restricciones del problema como de la función objetivo.

El modelo de programación matemática borrosa propuesto incorpora las restricciones de puntualidad en la llegada a estación considerando la incertidumbre en la aparición de retrasos, lo que permite imponer niveles de puntualidad mediante medidas de necesidad de puntualidad a cada estación.

Además, se modela la respuesta conductual del maquinista ante escenarios con retraso, comprobando que el comportamiento conservador del maquinista ante escenarios con retraso hace que este tipo de conducción consuma más energía que la conducción óptima para el mismo tiempo de recorrido. Tras el análisis mediante el modelo de simulación descrito en el capítulo 2, este incremento de energía es modelado como una función dependiente del tiempo de retraso recuperado durante el trayecto. La incertidumbre asociada a dicho comportamiento de recuperación ante retrasos se incorpora al modelo como una función lineal de pendiente borrosa.

En resumen, el modelo de optimización borrosa minimiza el consumo energético de un escenario con retrasos teniendo en cuenta el comportamiento del maquinista ante dichos retrasos.

La optimización de horarios de servicios comerciales mediante la distribución de tiempos de holgura es una herramienta que, unida a la utilización de conducciones manuales eficientes pueden proporcionar ahorros sustanciales en la explotación de los servicios ferroviarios de *Alta Velocidad*.

En el caso de aplicación del modelo propuesto se ha optimizado el horario comercial del servicio en operación 3113 entre Madrid y Barcelona con paradas en Calatayud, Zaragoza, Lérida y Tarragona respetando el tiempo de recorrido total y el tiempo de parada en cada estación, obteniendo un ahorro energético de un 6,67% para el escenario de retrasos base, lo que ratifica las ventajas de incorporar este método en el diseño de futuros horarios comerciales. Estos ahorros son atribuibles únicamente al rediseño del horario distribuyendo las holguras en los trayectos de forma óptima, ya que han sido calculados respecto del horario actualmente en servicio suponiendo conducciones eficientes.

Las aportaciones originales correspondientes a este capítulo son las siguientes:

- Modelo de diseño conjunto del horario comercial y la conducción eficiente asociada a cada trayecto, que minimiza el consumo total del viaje.
- Formulación y resolución del problema de optimización de horarios ferroviarios como un modelo de programación matemática borrosa.
- Modelado de la incertidumbre asociada a los retrasos mediante números borrosos, y expresión de los requisitos de puntualidad mediante la medida de necesidad de llegada puntual a estación.
- Modelado de la respuesta conductual del maquinista frente a retrasos en el cálculo del consumo que utiliza la función objetivo, y la incertidumbre asociada a dicha respuesta.

REGULACIÓN DE LA CONDUCCIÓN EN TIEMPO REAL

4.1. INTRODUCCIÓN

Los capítulos anteriores se han centrado en el diseño offline de los servicios ferroviarios de *Alta Velocidad*, tanto de sus horarios comerciales como de las conducciones manuales en cada uno de sus trayectos, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética global de los mismos sin comprometer su puntualidad.

Sería deseable que la explotación real de un servicio comercial se ajustara exactamente a la planificación diseñada offline, donde el maquinista solo tuviera que ejecutar las consignas de conducción diseñadas offline en cada trayecto. No obstante, durante los servicios se producirán inevitablemente perturbaciones en las que será necesaria la corrección de la conducción en tiempo real con el fin de cumplir el horario comercial y evitar la propagación de retrasos al resto de la malla.

El problema de la regulación ferroviaria consiste en el control y la supervisión en tiempo real para garantizar la segura explotación de los servicios, cumpliendo los horarios planificados o las frecuencias de paso establecidas, minimizando el efecto de los retrasos y garantizando la calidad del servicio. La regulación es una disciplina compleja dentro de la operación ferroviaria, y tiene una gran importancia en relación a la capacidad de los sistemas ferroviarios; dado que las inversiones en infraestructura son costosas, incrementar la capacidad de las líneas manteniendo la calidad de los servicios en un entorno donde las perturbaciones ocurren con tanta frecuencia es clave.

La solución del problema de la regulación suele consistir en problemas de optimización altamente no lineales, estocásticos y con un elevado número de restricciones, que aumentarán con la complejidad de la topología del sistema ferroviario en cuestión y con el mallado de las líneas (nº de trenes por hora). Cuanto más cerca esté un sistema de su capacidad máxima, menores serán los tiempos de holgura de cada servicio y de los servicios entre sí, provocando que cualquier retraso producido en uno de ellos se propague a los demás con facilidad.

Así, existen estudios de regulación de sistemas formados por varias líneas conectadas unas con otras (Dessouky and Leachman 1995), (Ning et al. 2006), (Lin and Sheu 2010). Otros estudios se centran en líneas independientes. Así, En (Murata 1998) se propone un método de regulación del tráfico en líneas de metro para minimizar los tiempos de espera de los viajeros. En (Rezanova and Ryan 2010) se propone un método para la recuperación de retrasos ante perturbaciones en líneas de metro a través de un algoritmo de Branch & Price que involucra a la conducción de varios servicios.

La mayoría de los estudios de regulación en tiempo real están adaptados a los sistemas de metro dotados de ATO. Así, en (Hiroyasu 1988) se desarrolla un controlador borroso que implementado en un sistema de conducción automática es capaz de modificar la operación del tren ante perturbaciones, que probaron en conducciones reales. En (C. S. Chang, Xu, and Quek 1999) se desarrolla un modelo de diseño de la conducción que posteriormente es incorporado al ATO, que aplican a una línea de corto recorrido para optimizar la puntualidad, el confort del viajero y el ahorro energético. En (Lin and Sheu 2010) se propone un sistema automático para la regulación mediante técnicas de programación dinámica.

Estos sistemas no son aplicables en líneas ferroviarias de *Alta Velocidad*, dado que la conducción y la regulación se realizan de forma manual por el maquinista. La función básica de regulación en tiempo real en líneas ferroviarias de largo recorrido o *Alta Velocidad* es la regulación por horario, donde cada tren debe cumplir su propio objetivo de horario planificado, tratando de recuperar los retrasos que se pudieran originar, bien durante el recorrido o bien durante las paradas, haciendo uso de los márgenes de tiempo disponibles en el horario comercial. Estos retrasos serán recuperados por los maquinistas según su propio criterio.

Cuando el maquinista detecta un retraso, típicamente trata de recuperarlo lo antes posible, aplicando la marcha tendida hasta recuperarlo, procedimiento que prima la puntualidad sobre la eficiencia energética. Algunos trenes como el Talgo-Bombardier S-102, están dotados de funciones de ayuda a la conducción como el control de velocidad, capaz de realizar regulaciones de velocidad puras, es decir, mantener la velocidad del tren en un valor constante aplicando el esfuerzo de tracción o freno necesario en cada momento. Esta función también suele ser usada por los maquinistas a la hora de recuperar retrasos, ya que les facilita la conducción, pero ni es eficiente (por el constante uso del freno), ni se adapta a las condiciones reales de cada servicio, siendo el maquinista el que debe controlar que la conducción se desarrolle de acuerdo a la planificación diseñada.

Además, actualmente la red española de *Alta Velocidad* se caracteriza por tener un tráfico homogéneo y capacidad sobrante, con lo que la función principal de la regulación será la de recuperar el retraso originado en un servicio. Por estos motivos, no se tendrán en cuenta otros problemas asociados a sistemas con topologías más complejas, como cruces, sobrepasos o replanificaciones de la malla que afecten a varios trenes, que solo se realizan en caso de incidencias importantes.

Por tanto, en este capítulo se presentará un método de regulación de la conducción en tiempo real que modificará, en los casos en que se considere necesario, las conducciones nominales diseñadas off-line con el fin de cumplir el horario comercial de la forma más eficiente posible y sin afectar a los servicios siguientes, y que diseñará el mismo tipo de consignas de alto nivel descritas en el capítulo segundo, adecuadas para su ejecución manual y que serán ejecutadas manualmente por el maquinista. Para ello, se monitorizará de forma continua el retraso instantáneo del servicio, lo que se diferencia respecto al procedimiento empleado en la actualidad, donde el maquinista solo puede medir el tiempo de adelanto o retraso a su paso por los diferentes puntos de control de la hoja de ruta del servicio. Por otro lado, el modelo propuesto tendrá en cuenta la incertidumbre asociada a la conducción manual, que provocará que una misma lista de consignas de una conducción, al ser ejecutada manualmente por dos maquinistas diferentes, proporcione distintos tiempos de recorrido y consumos asociados.

Al igual que en el capítulo tercero, el modelado borroso de la conducción hará necesario definir restricciones de puntualidad a la llegada a estación como medidas de necesidad de llegada puntual. De esta manera, se impondrá un nivel de puntualidad a la llegada que deberá cumplir cada conducción que sea recalculada en tiempo real.

Dado que la regulación se realiza de manera manual en los sistemas de Alta Velocidad, los diferentes estudios encontrados en la literatura se han centrado en el diseño de aplicaciones de asistencia al maquinista en cabina.

Así, en (Yasukawa et al. 1987) se desarrolla un sistema embarcado para el ahorro energético y el control del horario destinado al tren japonés de *Alta Velocidad* Shinkansen con trayectos cortos comparados con las líneas de *Alta Velocidad* españolas. Dicho sistema asiste al maquinista en tiempo real mediante una única velocidad de regulación pura (con freno) a mantener en todo el recorrido y un punto de deriva final. Fue probado en la línea Tohoku-Shinkansen, logrando ahorros de alrededor del 10% respecto a la conducción típica de los maquinistas, resultados que logran reduciendo los procesos de tracción y freno y aumentando los tramos de deriva.

Otro sistema de regulación en el que a través de una pantalla se muestra al maquinista la consigna de velocidad adecuada nació del proyecto sueco CATO (Leander et al. 2000), cuyo objetivo consistió en el control eficiente del tráfico ferroviario mediante comunicación vía radio entre los trenes y el centro de control, calculando en tiempo real cómo debían conducirse los trenes dependiendo de las condiciones dadas, aprovechando el tiempo de holgura real de los servicios. El sistema propone al maquinista un perfil de velocidad a seguir manualmente de forma

continua, y por tanto no contempla derivas como estrategia de conducción eficiente. Las consignas que exigen al maquinista seguimiento continuo de una curva son difíciles de ejecutar por el maquinista en comparación con consignas de alto nivel, especialmente en largos recorridos.

En (Ching Changa and Chung 2005) se propone un método basado en un *Algoritmo Genético* para el recálculo de la conducción ante perturbaciones ocurridas principalmente por tiempos de parada prolongados en estación. Sus soluciones parten de las conducciones nominales diseñadas offline, lo que les permite reducir el tiempo de cálculo, pero también limitarán el ahorro energético conseguido, ya que las condiciones en que se diseña una conducción offline y las condiciones en que se rediseña suelen ser diferentes.

En (D'Ariano and Albrecht 2006) se propone un modelo de optimización en tiempo real de la conducción en situaciones de perturbación de horarios en las heterogéneas y altamente malladas líneas holandesas, donde pequeños retrasos pueden producir grandes perturbaciones en la malla. Dicho modelo se basa en un algoritmo heurístico para recalcular nuevos perfiles de velocidad que satisfagan las necesidades de puntualidad reales con el mínimo consumo energético, y teniendo en cuenta las restricciones impuestas por la señalización.

En (Cicerone et al. 2009) se utiliza un método para minimizar el tiempo de espera entre pasajeros, lo que es de mayor aplicación en sistemas de metro que funcionan por intervalo. El modelo propuesto en este capítulo no solo buscará el cumplimiento del horario, sino la minimización del consumo energético.

En (Lechelle and Mouneimne 2010) se desarrolla un sistema destinado al diseño óptimo de perfiles de velocidad para cumplir con un tiempo de recorrido comercial con el mínimo consumo energético. El proceso empleado para el diseño del perfil de velocidad óptimo es un *Algoritmo Genético* basado en simulación, cuyo resultado son las consignas a implementar. El modelo se propone inicialmente para el diseño offline y la configuración de las marchas de los equipos ATO. El modelo propuesto no calcula consignas de alto nivel sino una lista detallada de cambios de consignas frecuentes difícilmente ejecutables manualmente en una línea de *Alta Velocidad*. Por tanto sería más adecuado en líneas tipo cercanías y trenes equipados con ATO.

El Scheduling and Control Group (SCG) de la Universidad South Australia desarrolló un sistema de aviso embarcado para ayudar al maquinista a ajustarse al tiempo de recorrido comercial ahorrando energía y satisfaciendo las restricciones del servicio (Coleman et al. 2010). Este sistema controla la posición y velocidad instantánea del tren mediante un sistema de GPS embarcado y actualiza constantemente dicha información en cabina durante el trayecto. Dependiendo de la información de retraso recibida del puesto de mando, el maquinista puede elegir en cualquier momento entre siete conducciones eficientes prediseñadas, que comienzan desde la conducción a marcha tendida hasta la que cumple el tiempo de recorrido nominal. Este sistema, siendo un avance respecto a la ausencia total de asistencia en tiempo real, no se adapta a las condiciones particulares de cada servicio, sino que utiliza una serie de conducciones preestablecidas, cada una de ellas diseñada para recuperar un tiempo

de retraso concreto, además de que deja la elección de las mismas al maquinista, lo que dista de ser sistemático y óptimo. En 2004 utilizaron este sistema en la línea Adelaide-Melbourne, consiguiendo unos ahorros del 5% a lo largo de las colinas de Adelaide y un 12% para el resto del trayecto.

El sistema anterior es similar al desarrollado en algunas líneas metropolitanas dotadas de equipos de conducción automática (ATO) (Domínguez et al. 2011). En estos sistemas, a la salida de cada interestación se carga en el equipo de ATO la conducción prediseñada a aplicar durante el siguiente trayecto, que depende de las condiciones de retraso a la salida de la misma. En este caso es el centro de control el que decide qué conducción efectuará cada tren con el fin de desempeñar la regulación de la línea, además de que no son posibles cambios de conducción durante el trayecto. Este tipo de solución da buenos resultados en líneas metropolitanas con interestaciones cortas donde solo se actualizan los retrasos y las consignas en estación, pero no es adecuado en líneas de largo recorrido, que precisan adaptar la conducción a nuevos retrasos originados o acumulados durante la conducción.

En (Carbone, Papa, and Sacco 2012) se define un modelo de Programación matemática basado en el método del gradiente para minimizar el impacto de los escenarios retrasados en sistemas de Metro, donde se emplean las probabilidades de ocurrencia de retrasos durante las paradas. El modelo propuesto en este capítulo considerará tanto los retrasos originados durante las paradas en estación como los acumulados durante el recorrido.

En el presente capítulo se propondrá un método de monitorización del retraso en tiempo real, y recálculo de marcha de manera que ante retrasos elevados se rediseñará en tiempo real una conducción eficiente más rápida que la nominal, que será capaz de recuperar el retraso vigente. El modelo tendrá en cuenta la incertidumbre en el modelo de conducción manual, incorporada mediante un modelo borroso de la velocidad de regulación y del tiempo borroso de aplicación del cambio de consigna por parte del maquinista. El objetivo es el cumplimiento de puntualidad a la llegada a estación expresada de forma borrosa como un nivel de necesidad. El modelo de optimización es un Algoritmo Evolutivo basado en simulación de marcha con parámetros borrosos.

4.2. MODELO

En el capítulo tercero se propuso un modelo de optimización de horarios de servicios comerciales de *Alta Velocidad* teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a los retrasos producidos durante los mismos. El resultado de dicho modelo es el horario comercial que optimiza el consumo energético global de un servicio para un escenario de retrasos concreto, imponiendo unos niveles de puntualidad a la llegada de cada estación.

Este capítulo partirá de los resultados fruto del capítulo 2 y 3, es decir, del horario comercial óptimo y de las conducciones nominales eficientes asociadas, y su objetivo

consistirá en la regulación en tiempo real de dichas conducciones, pudiendo ser recalculadas en tiempo real si la situación lo requiere.

El modelo de regulación que se presentará en este capítulo supervisará de forma continua el retraso instantáneo respecto al horario comercial, de forma que si éste se encuentra por debajo de cierto umbral de retraso, las consignas nominales seguirán siendo válidas. En cambio, si por cualquier motivo el retraso superara dicho umbral de retraso, el regulador del modelo lanzará un algoritmo para el recálculo en tiempo real de una nueva conducción con el objetivo de recuperar el retraso de la forma más eficiente, con el mismo requisito borroso de puntualidad a la llegada.

En este capítulo se incorporará al modelo la incertidumbre asociada a la ejecución manual de la lista de consignas. El origen de dicha incertidumbre podrá ser debida a los siguientes factores:

- Distracciones del maquinista que resultaban en fluctuaciones de la velocidad instantánea alrededor de la velocidad de regulación deseada.
- Tendencia a regular velocidad a valores ligeramente superiores o inferiores que el valor correspondiente de velocidad de regulación.
- Error en el instante de aplicación del cambio de consigna, que el maquinista realiza en las cercanías del punto kilométrico indicado pero podrá ser antes o después de dicho punto.

Esta variabilidad se tomará como una fuente de incertidumbre en el diseño de las nuevas conducciones, incertidumbre que será incorporada en la matriz de consignas de la conducción, donde en lugar de definir cada uno de los elementos de la Matriz como números Crisp, se definirán mediante números borrosos (R. E. Bellman and Zadeh 1970).

En el capítulo 2 se definieron los componentes de la matriz de consignas de una conducción manual, que contiene los puntos de cambio de consigna a lo largo del trayecto y las velocidades de regulación a implementar a lo largo del mismo, según muestra la Figura 4-1.

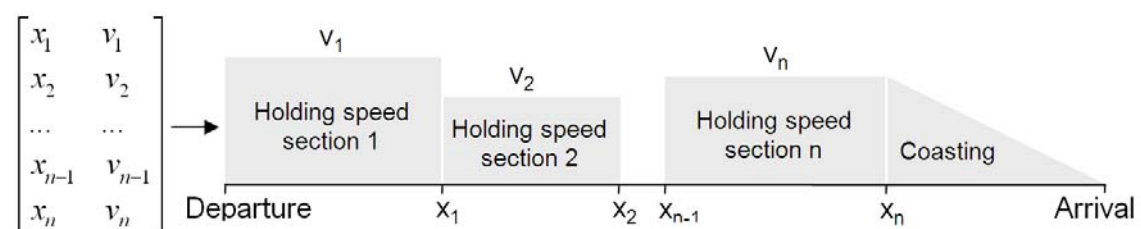


Figura 4-1. Estructura general de una conducción manual eficiente.

Para modelar la incertidumbre asociada a la conducción manual, tanto los puntos espaciales de cambio de consigna como las velocidades de regulación serán transformadas en números borrosos:

Velocidad de regulación \hat{v}_i

La velocidad de regulación se modelará como un número borroso triangular \hat{v}_i cuyo núcleo será el valor Crisp v_i (el valor de velocidad de regulación diseñada) y su soporte (Δv_i) estará centrado en dicho núcleo, según se muestra en la Figura 4-2a.

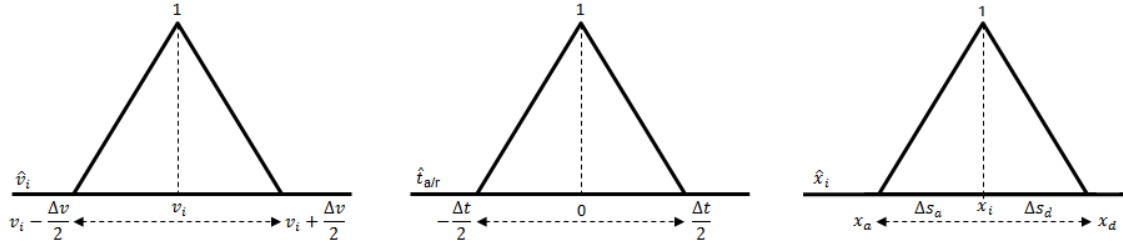


Figura 4-2. a) Velocidad de regulación borrosa \hat{v}_i b) Tiempo de anticipación/retraso borroso $\hat{t}_{a/r}$. c) Posición de cambio de consigna borrosa \hat{x}_i .

Tiempo de respuesta $\hat{t}_{a/r}$ y posición de cambio de consigna \hat{x}_i

A pesar de que el maquinista dispone de la matriz de consignas durante la conducción, en general los cambios de consigna no se realizarán en la posición de cambio de consigna exacta debido a una anticipación o retraso por parte del maquinista.

Esta anticipación o retraso será modelada como un tiempo de anticipación/retraso borroso $t_{a/r}$, definido como la desviación respecto al momento exacto en que el maquinista debería aplicar el siguiente comando. Este tiempo será también modelado como un número borroso triangular simétrico y centrado en cero, es decir, se asignará uno a la posibilidad de aplicar el cambio de consigna en el momento exacto. El soporte del tiempo de adelanto/retraso (Δt) , también estará centrado alrededor del núcleo (Figura 4-2b).

El tiempo de anticipo/retraso $t_{a/r}$ en la aplicación de una nueva consigna provocará un adelanto/retraso de la posición de cambio de la nueva consigna. Por lo tanto, la posición de cambio de consigna resultante será también un número borroso \hat{x}_i , obtenido mediante la suma de la posición Crisp de cambio de consigna x_i y el producto de los números borrosos \hat{v}_i y $\hat{t}_{a/r}$ (Gao and Zhang 2009) según indica la ecuación 4.1. (Figura 4-2c).

$$\hat{x}_i = x_i + \hat{v}_i \cdot \hat{t}_{a/r} \quad \forall 1 \leq i \leq n \quad 4.1$$

De esta manera, las funciones de pertenencia de la velocidad de regulación y del tiempo de anticipo/retraso son las indicadas en las ecuaciones 4.2 y 4.3.

$$\mu_{v_i}(y) = \begin{cases} 0 & \text{if } y \leq v_i - \frac{\Delta v}{2} \\ \frac{2}{\Delta v} \cdot y - \frac{2v_i}{\Delta v} + 1 & \text{if } v_i - \frac{\Delta v}{2} \leq y \leq v_i \\ \frac{-2}{\Delta v} \cdot y + \frac{2v_i}{\Delta v} + 1 & \text{if } v_i \leq y \leq v_i + \frac{\Delta v}{2} \\ 0 & \text{if } y \geq v_i + \frac{\Delta v}{2} \end{cases} \quad \forall 1 \leq i \leq n \quad 4.2$$

Siendo v_i la velocidad de regulación Crisp de la consigna i y Δv_i el soporte de la velocidad de regulación borrosa de la consigna i .

$$\mu_{t_{air}}(y) = \begin{cases} 0 & \text{if } y \leq -\frac{\Delta t}{2} \\ \frac{2}{\Delta t} \cdot y + 1 & \text{if } -\frac{\Delta t}{2} \leq y \leq 0 \\ \frac{-2}{\Delta t} \cdot y + 1 & \text{if } 0 \leq y \leq \frac{\Delta t}{2} \\ 0 & \text{if } y \geq \frac{\Delta t}{2} \end{cases} \quad \forall 1 \leq i \leq n \quad 4.3$$

Siendo Δt el soporte del tiempo borroso al pasar de la consigna i a la consigna $i + 1$.

Una vez transformados los elementos de la matriz de consignas en velocidades y posiciones de cambio de consigna borrosos, ésta incorporará la incertidumbre asociada a la conducción manual.

A continuación se impondrá un requisito de puntualidad a la llegada a estación, expresado mediante una medida borrosa. Este requisito de puntualidad se definirá, al igual que en el capítulo anterior, como un valor de necesidad de puntualidad Np , que podrá ser diferente según la estación. Cuanto mayor sea el requisito de puntualidad, menor deberá ser el tiempo de recorrido objetivo con el que se diseñe la nueva conducción y por lo tanto menor será el potencial de ahorro energético en dicho trayecto.

En la práctica, al simular una matriz de consignas borrosa se obtendrá como resultado un tiempo de recorrido borroso, un tiempo de llegada a la siguiente estación borroso y un consumo asociado a dicha conducción también borroso, cuyos soportes dependerán de los soportes de los parámetros borrosos de la matriz de consignas. De esta manera, toda matriz de consignas borrosa estará asociada a una conducción nominal, definida por un tiempo de recorrido (T) y un consumo energético (E) (Figura 4-3).

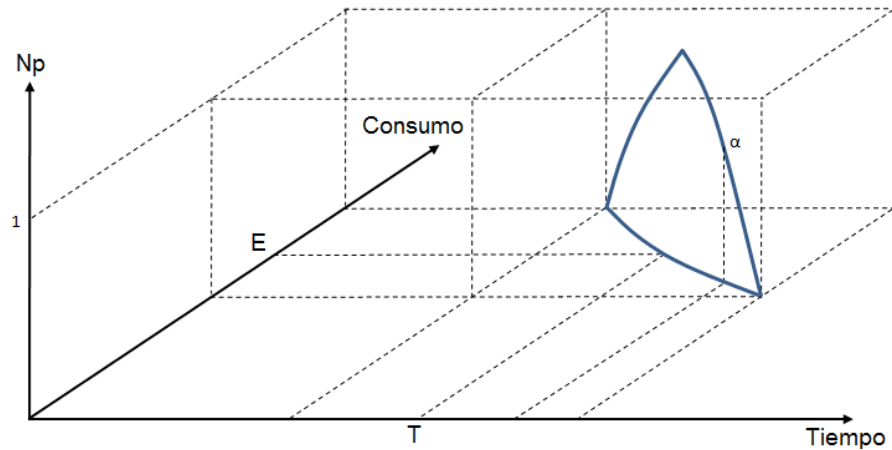


Figura 4-3. Dispersión de tiempos de recorrido y consumos energéticos asociados a una conducción borrosa.

El requisito de puntualidad asociado a la llegada borrosa a la siguiente estación se expresará según la ecuación 4.4, donde se permitirá un cierto grado de incumplimiento de dicho requisito.

$$\hat{T}_{ll} \lesssim T_{ll} \tag{4.4}$$

Siendo \hat{T}_{ll} el tiempo de llegada a estación borroso y T_{ll} el tiempo de llegada indicado en el horario comercial.

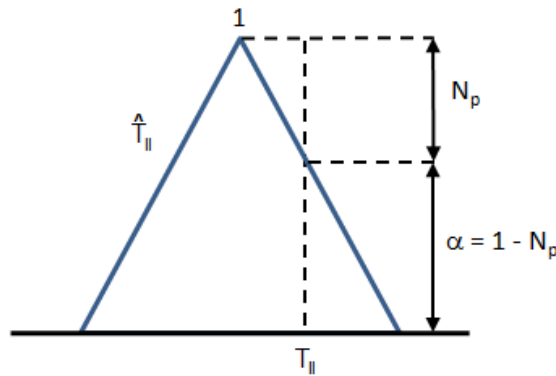


Figura 4-4. Puntualidad a la llegada y posibilidad de llegada retrasada.

El tiempo de recorrido restante necesario para cumplir con el tiempo de llegada comercial (t_r) será igual a la diferencia entre la hora de llegada comercial y la hora instantánea, según indica la ecuación 4.5.

$$t_r = T_{ll} - t \tag{4.5}$$

Siendo T_{ll} el tiempo de llegada comercial y t el tiempo instantáneo.

Por otro lado, el tiempo de recorrido necesario para cumplir con el tiempo de llegada comercial (t_r) será también igual a la diferencia entre el tiempo de recorrido comercial

desde la posición actual del tren y el tiempo de retraso instantáneo, como muestra la ecuación 4.6.

$$t_r = t_{rc} - t_d \quad 4.6$$

Por tanto, el requisito de puntualidad a cumplir se puede expresar en función del tiempo de recorrido, según la ecuación 4.7.

$$\widehat{T}_{obj} \lesssim t_r \quad 4.7$$

Siendo \widehat{T}_{obj} el tiempo de recorrido borroso objetivo a cumplir para llegar puntual a la siguiente estación y t_r el tiempo de recorrido restante para llegar con puntualidad a la siguiente estación.

4.3. ALGORITMO EVOLUTIVO CON PARÁMETROS BORROSOS

Durante un servicio comercial, en ocasiones se producen incidencias que provocan perturbaciones, como salidas de estación retrasadas por la demora de los viajeros, límites de velocidad temporales no tenidos en cuenta en el diseño offline de la conducción, perturbaciones transmitidas por servicios precedentes, etc.

Como se indicó en el capítulo anterior, normalmente la reacción de los maquinistas ante este tipo de retrasos es aplicar una conducción de recuperación “inmediata” del retraso, es decir, aplicar marcha tendida hasta recuperar la totalidad del mismo, momento en que vuelven a implementar la conducción nominal del trayecto.

Esta política de actuación se muestra la Figura 4-5, donde se ha simulado una conducción en el trayecto Madrid-Zaragoza donde un límite de velocidad temporal no tenido en cuenta en el diseño offline de la conducción entre los puntos kilométricos 100 y 120 hace acumular un tiempo de retraso de 95s. Tras finalizar la limitación se aplica marcha tendida hasta que el retraso desaparece, lo que sucede alrededor del punto kilométrico 182. En ese momento se aplica un tramo de deriva hasta recuperar la conducción nominal diseñada offline. Durante el tramo de deriva desde la velocidad máxima de la línea hasta que el tren alcanza la velocidad de regulación nominal se produce un cierto adelanto respecto a la marcha nominal, lo que se ve reflejado en la gráfica tercera de la Figura 4-5, que muestra el retraso instantáneo (negativo es adelanto) y los márgenes de tiempo teórico y real del servicio.

Este modo de actuar es el más conservador desde el punto de vista de la puntualidad, ya que consiste en recuperar el retraso acumulado en el menor tiempo posible. No obstante, desde el punto de vista de la eficiencia energética existen alternativas de conducción mejores que la marcha tendida, que suele requerir tramos de frenado para no exceder la velocidad máxima de la línea, lo que también se muestra en la gráfica segunda de la Figura 4-5, que muestra el esfuerzo instantáneo.

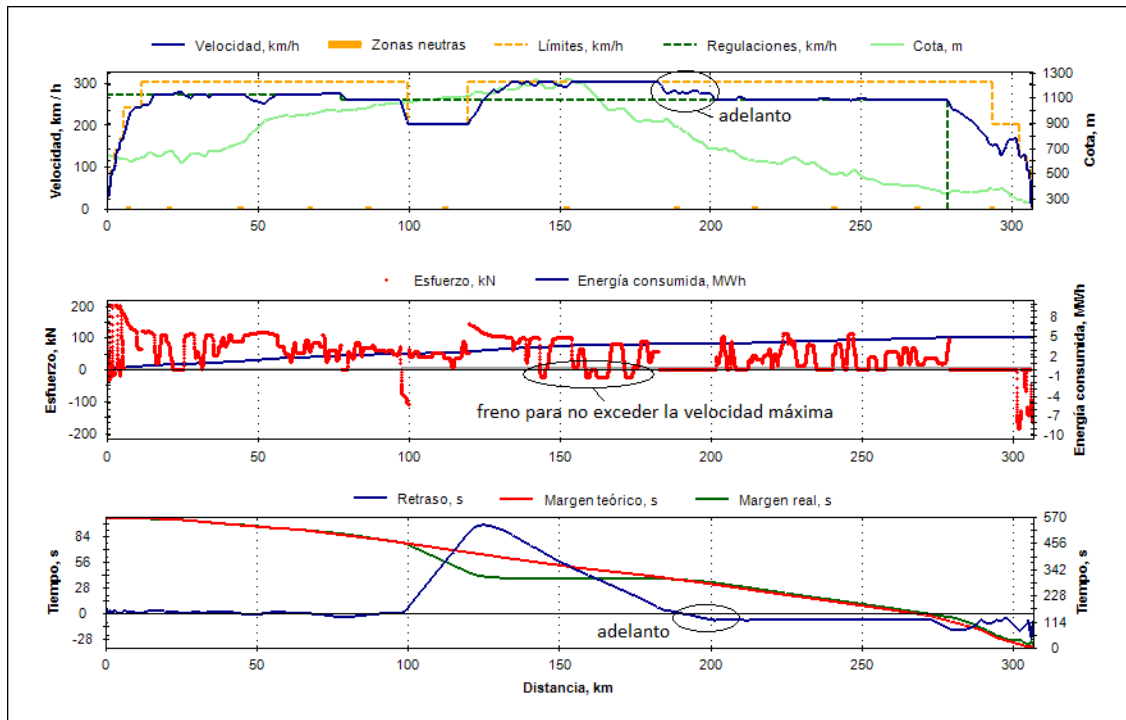


Figura 4-5. Recuperación del retraso acumulado con conducción a marcha tendida tras un límite temporal de velocidad.

Las dos ventajas fundamentales del regulador propuesto en este capítulo serán la monitorización continua del retraso instantáneo, lo que garantizará la detección inmediata de retrasos excesivos, y el recálculo de conducciones eficientes que recuperen dichos retrasos con un consumo menor que la conducción de recuperación “inmediata” de retraso. La nueva conducción calculada en tiempo real estará adaptada a las características instantáneas del servicio (retraso instantáneo, distancia y tiempo total disponible hasta destino) en el momento de ser calculadas.

Dado que el recálculo en tiempo real de una nueva conducción eficiente adaptada a las condiciones del servicio requerirá un cierto tiempo de ejecución del algoritmo empleado, se deberá llegar a un compromiso entre dicho tiempo de ejecución y la eficiencia de la conducción obtenida. Es decir, en tiempo real primará la rapidez en el recálculo de conducciones eficientes, que es innecesaria en el diseño offline.

El proceso para obtención de una conducción eficiente en tiempo real consistirá en la aplicación del *Algoritmo Evolutivo* detallado en el capítulo 2, con la particularidad de que en este caso las conducciones serán codificadas mediante una matriz de consignas borrosa, de manera que al proceso se le denominará *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos. Además, como se indicó anteriormente, el tiempo de recorrido objetivo borroso deberá ser menor que el tiempo de recorrido necesario para cumplir con el tiempo de llegada comercial.

Este requisito de puntualidad a la llegada a estación se expresará como medida de necesidad de puntualidad, de manera que al aplicar la matriz de consignas Borrosa se produzcan un conjunto de pares de valores tiempo de recorrido – consumo energético que cumplan con dicho nivel de necesidad de puntualidad (Figura 4-6).

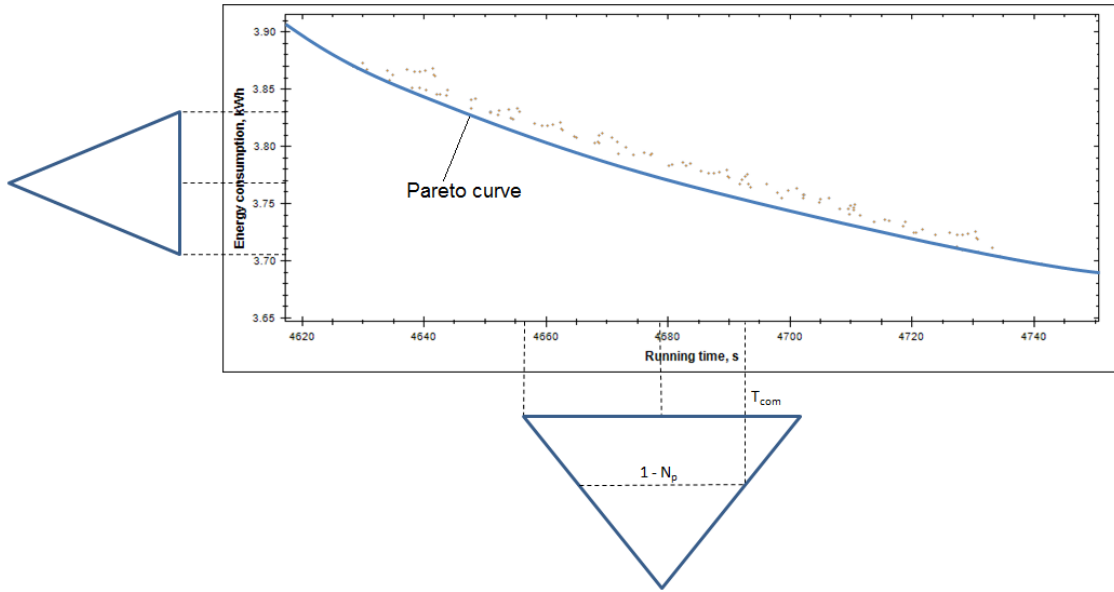


Figura 4-6. Conducciones asociadas a una matriz de consignas borrosa que satisface un nivel de puntualidad N_p .

La función objetivo del *Algoritmo Evolutivo con parámetros borrosos* evaluará tanto el tiempo de recorrido como el consumo energético mediante la ecuación 4.8.

$$\widehat{F}(\widehat{T}_e, \widehat{E}_e) = \begin{cases} w_e \cdot \frac{\widehat{E}}{E_{tendida}} + w_t \cdot \frac{\widehat{T}}{T_{obj}} & \text{si } \widehat{T} > T_{obj} \\ w_e \cdot \frac{\widehat{E}}{E_{tendida}} + w_t \cdot \frac{T_{obj}}{\widehat{T}} & \text{si } \widehat{T} \leq T_{obj} \end{cases} \quad 4.8$$

Siendo w_e el peso asociado al término de la energía consumida, $E_{tendida}$ la energía consumida por la conducción a marcha tendida, \widehat{E} el consumo energético borroso, w_t el peso asociado al término del tiempo de recorrido, T_{obj} el tiempo de recorrido objetivo y \widehat{T} el tiempo de recorrido borroso.

El objetivo del *Algoritmo Evolutivo con parámetros borrosos* es encontrar la matriz de consignas borrosa cuyo tiempo de recorrido borroso satisfaga el nivel de necesidad de puntualidad a la llegada y por tanto logrando recuperar el retraso acumulado. El tiempo de recorrido de la conducción tiene una dependencia directa con los valores de la matriz de consignas borrosa:

El tiempo de adelanto/retraso al aplicar un cambio de consigna afectará al tiempo de recorrido del trayecto, y dependiendo de los valores de velocidad de regulación implicados, dicho tiempo de recorrido aumentará o disminuirá:

Caso A. Si la velocidad de regulación de la siguiente consigna es mayor que la actual, el tiempo de recorrido se incrementará ante un retraso en la aplicación de la nueva consigna.

Caso B. Si la velocidad de regulación de la siguiente consigna es menor que la actual, el tiempo de recorrido disminuirá ante un retraso en la aplicación de la nueva consigna.

Velocidad de regulación

El tiempo de recorrido disminuirá con el aumento de la velocidad de regulación.

Teniendo en cuenta las relaciones anteriores es posible obtener los límites inferior y superior de los α -cortes del tiempo de recorrido mediante simulación, utilizando los α -cortes de las posiciones de cambio y velocidades de regulación borrosas, según muestran las expresiones 4.9 y 4.10.

- Límite superior del α -corte del tiempo de recorrido

$$T_{\alpha}^- = F(t_{a/r,\alpha}^{casoA}, t_{a/r,\alpha}^{casoB}, v_{i,\alpha}) \quad 4.9$$

- Límite inferior del α -corte del tiempo de recorrido

$$T_{\alpha}^+ = F(t_{a/r,\alpha}^{casoA}, t_{a/r,\alpha}^{casoB}, v_{i,\alpha}) \quad 4.10$$

Siendo F la función de simulación de la conducción del tren.

En la práctica, el proceso de optimización de la conducción manual mediante el *Algoritmo Evolutivo con parámetros borrosos* se iniciará ejecutando el *Algoritmo Evolutivo* detallado en el capítulo 2 para un tiempo objetivo igual al tiempo de recorrido restante para una llegada puntual (t_r), lo que dará como resultado una matriz de consignas que, aplicadas de manera exacta, lograrían una llegada puntual en la estación de destino.

A continuación se simula, para dicha matriz de consignas, el tiempo de recorrido que se obtendría para el α -corte superior del conjunto borroso \hat{T}_{obj} , para $\alpha = 1 - Np$. Con esto se conseguirá estimar el tiempo sobrepasado al tiempo de recorrido restante necesario para cumplir con el tiempo de llegada comercial (Figura 4-7).

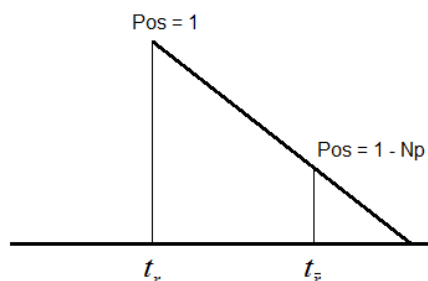


Figura 4-7. Conducciones asociadas a una matriz de consignas borrosa.

De esta manera, el tiempo por el que se incumple el nivel de puntualidad es igual a la diferencia entre $t_{\bar{r}}$ y t_r . A continuación se fijará un nuevo tiempo objetivo para una

nueva ejecución del *Algoritmo Evolutivo*, que será igual a dicha diferencia ($t_{\bar{r}} - t_r$). La nueva ejecución del *Algoritmo Evolutivo* obtendrá una nueva matriz de consignas, que será de nuevo simulada, comprobando que cumpla con el nivel de necesidad de puntualidad impuesto, iterando si fuera necesario.

A continuación se describen en detalle los pasos a seguir para la aplicación del *Algoritmo Evolutivo con parámetros borrosos*:

Paso 0

Se establece el tiempo de tiempo de recorrido objetivo que deberá cumplir la nueva conducción diseñada a partir del momento en que se dispara el algoritmo de cálculo. Este tiempo tendrá en cuenta el retraso instantáneo, y será igual al tiempo de recorrido restante necesario para cumplir con el tiempo de llegada comercial (t_r) pero teniendo también en cuenta el tiempo de ejecución del algoritmo, ya que el objetivo del nuevo diseño será proporcionar una conducción eficiente que lo recupere (ecuación 4.11).

$$T_{obj} = t_r = t_{rc} - T_{AEB} - t_d \quad 4.11$$

Siendo t_{rc} el tiempo de recorrido comercial restante del servicio, T_{AEB} el tiempo de ejecución del *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos y t_d el retraso instantáneo del tren.

En la ecuación 4.11, el tiempo de recorrido comercial restante del servicio (t_{rc}) se calcula como la diferencia entre el tiempo de llegada comercial a la estación de destino del trayecto (T_{ll}) y el tiempo de paso comercial por el punto actual en el instante de disparar el *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos (t_{pc}), como muestra la ecuación 4.12.

$$t_{rc} = T_{ll} - t_{pc} \quad 4.12$$

Por otro lado, se define el retraso instantáneo en un punto como la diferencia entre el tiempo de paso real y el tiempo de paso comercial por dicho punto, según indica la ecuación 4.13.

$$t_d = t - t_{pc} \quad 4.13$$

Como la Hoja de Ruta del servicio comercial solo indica tiempos de paso comerciales por los puntos de control del servicio, es necesario establecer un método para hallar la hora de paso comercial por cualquier punto del trayecto. Para ello se utilizará la interpolación lineal, de manera que la hora de paso comercial por un punto cualquiera del trayecto se calculará interpolando linealmente las horas de paso comerciales por sus puntos de control adyacentes, según indica la ecuación 4.14.

$$t_{pc} = \frac{T_{pc,i} - T_{pc,i+1}}{X_{pc,i} - X_{pc,i+1}} \cdot s + T_{pc,i} - \frac{T_{pc,i} - T_{pc,i+1}}{X_{pc,i} - X_{pc,i+1}} \cdot X_{pc,i} \quad 4.14$$

Siendo $X_{pc,i}$ y $X_{pc,i+1}$ la posición de los puntos de control entre los que se encuentra el tren, y $T_{pc,i}$ y $T_{pc,i+1}$ la hora de paso comercial por dichos puntos.

Sustituyendo en la ecuación 4.13 la hora de paso comercial por la ecuación 4.14 se obtiene la expresión desarrollada del tiempo de retraso instantáneo, indicado en la ecuación 4.15.

$$t_d = t - \left(\frac{T_{pc,i} - T_{pc,i+1}}{X_{pc,i} - X_{pc,i+1}} \cdot s + T_{pc,i} - \frac{T_{pc,i} - T_{pc,i+1}}{X_{pc,i} - X_{pc,i+1}} \cdot X_{pc,i} \right) \quad 4.15$$

Si la posición instantánea del tren coincide con la posición del punto de control inicial $X_{pc,i}$, el retraso instantáneo será el indicado en la ecuación 4.16, mientras que si coincide con la posición del punto de control final $X_{pc,i+1}$, el retraso instantáneo será el indicado en la ecuación 4.17.

$$t_d = t - T_{pc,i} \quad 4.16$$

$$t_d = t - T_{pc,i+1} \quad 4.17$$

Calculando de esta manera el retraso es posible realizar una monitorización continua del mismo, lo que permite reaccionar con mayor rapidez ante retrasos excesivos.

Paso 1

Una vez definido el tiempo objetivo, se ejecutará el *Algoritmo Evolutivo*, obteniendo una matriz de consignas M_c que definirá la conducción óptima para dicho tiempo objetivo. Dicha matriz será transformada en la matriz de consignas borrosa mediante el procedimiento detallado anteriormente, de manera que los elementos de la matriz de consignas Crisp M_c serán los núcleos de los números borrosos de la matriz de consignas borrosa (\widehat{M}_c).

Paso 2

La matriz de consignas hallada previamente no satisfará el nivel de puntualidad requerido, y por ello se hallará el límite superior del α -corte del tiempo de recorrido borroso correspondiente a $\alpha = 1 - N_p$. Para ello se simulará la conducción más desfavorable desde el punto de vista de la puntualidad particularizando la matriz de consignas borrosa anterior (\widehat{M}_c) y obteniendo la matriz $M_{c,w}$, cuyos elementos se hallarán de la siguiente manera:

- Velocidades de regulación: se tendrá en cuenta el límite inferior del α -corte de cada velocidad de regulación borrosa, que se calculará según indica la ecuación 4.18.

$$v_{i,\alpha} = v_i + (\alpha - 1) \cdot \frac{\Delta v}{2} \quad \forall 1 \leq i \leq n \quad 4.18$$

Siendo $v_{i,\underline{\alpha}}$ el límite inferior del α -corte de la velocidad de regulación borrosa en el tramo i , v_i el núcleo de la velocidad de regulación borrosa, α el valor del corte propiamente dicho, y Δv el soporte de la velocidad de regulación borrosa. El valor α se calculará como indica la ecuación 4.19 (Figura 4-8).

$$\alpha = 1 - Np \tag{4.19}$$

Siendo α el valor del corte propiamente dicho y Np el nivel de puntualidad requerido a la llegada a estación.

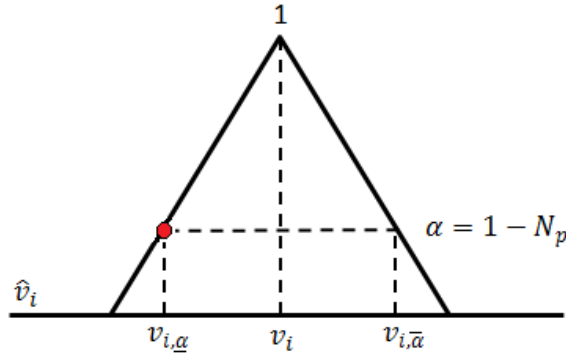


Figura 4-8. Límite inferior del α -corte de la velocidad de regulación borrosa.

- El tiempo de adelanto/retraso en la aplicación de las consignas se calculará según indica la expresión 4.20.

$$t_{a/r} \begin{cases} t_{a/r,\bar{\alpha}} & \forall v_i < v_{i+1} \text{ (caso A)} \\ t_{a/r,\underline{\alpha}} & \forall v_i > v_{i+1} \text{ (caso B)} \end{cases} \quad \forall i = 1, n-1 \tag{4.20}$$

La Figura 4-9 muestra un ejemplo gráfico la conducción que caracteriza el peor escenario posible para un nivel de necesidad de puntualidad Np determinado y para una conducción consistente en cuatro consignas.

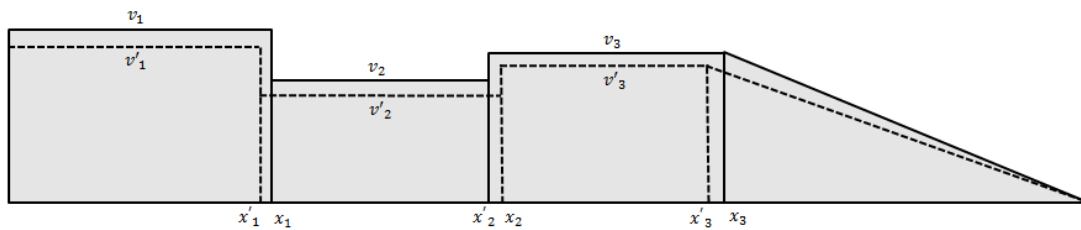


Figura 4-9. Conducción del peor escenario desde el punto de vista de la puntualidad.

Paso 3

La matriz de consignas así obtenida se simulará, dando lugar al límite superior del α -corte del tiempo de recorrido, ecuación 4.21.

$$T_{\alpha}^{-} = F(t_{a/r,\bar{\alpha}}^{casoA}, t_{a/r,\underline{\alpha}}^{casoB}, v_{i,\underline{\alpha}}) \tag{4.21}$$

Siendo $T_{\bar{\alpha}}$ el límite superior del α -corte del tiempo de recorrido borroso y F la función de simulación de la conducción para las características concretas del trayecto y tren empleados.

El valor del límite superior del α -corte del tiempo de recorrido obtenido será mayor que el tiempo de recorrido objetivo del trayecto definido en la expresión 4.11, valor que se procederá a modificar en el siguiente paso.

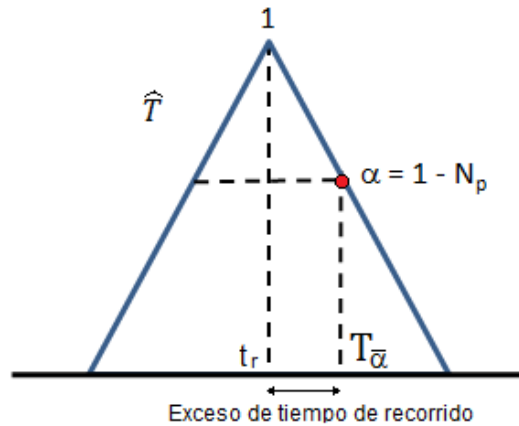


Figura 4-10. Tiempo de recorrido de la conducción del peor escenario desde el punto de vista de la puntualidad.

Paso 4

En este paso se modificará el valor del tiempo objetivo de la conducción según indica la ecuación 4.22.

$$T'_{obj} = T_{obj} - (T_{\bar{\alpha}} - t_r) \quad 4.22$$

Siendo T'_{obj} el nuevo tiempo objetivo, T_{obj} el tiempo objetivo utilizado en la ejecución del *Algoritmo Evolutivo* en el ciclo anterior, $T_{\bar{\alpha}}$ el límite superior del α -corte del tiempo de recorrido borroso hallado en el paso anterior, y t_r el tiempo de recorrido restante para una llegada puntual hallado en el paso 0.

En este punto se regresa al paso 1, donde se ejecuta de nuevo el *Algoritmo Evolutivo* manteniendo constantes todos los datos y parámetros de entrada salvo el tiempo objetivo, que esta vez será el obtenido de la ecuación 4.22. Tras la ejecución del *Algoritmo Evolutivo* se obtendrá una nueva conducción eficiente definida con una nueva matriz de consignas.

El proceso iterativo definido en los anteriores pasos se dará por concluido si una vez ejecutado el paso tercero, el límite superior del α -corte del tiempo de recorrido es igual al tiempo objetivo inicial de tiempo de recorrido para cumplir la llegada comercial. La conducción así obtenida satisfará el nivel de necesidad de puntualidad Np a la llegada de estación. El diagrama de bloques de la Figura 4-11 muestra el proceso del *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos.

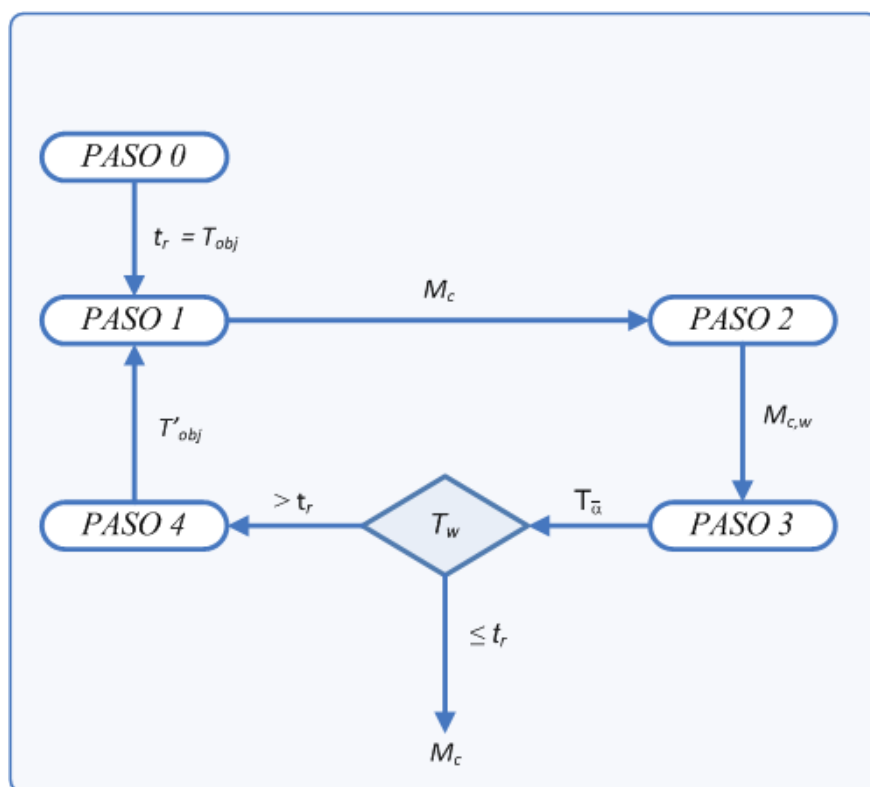


Figura 4-11. Diagrama de bloques del *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos.

4.4. REGULADOR DE LA CONDUCCIÓN EN TIEMPO REAL

En el apartado anterior se detalló el proceso del *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos a ejecutar para calcular conducciones eficientes que satisfagan un nivel de puntualidad deseado a la llegada. No obstante, no se indicó en qué momento dicho Algoritmo se ejecutará. Para establecer el momento en que será necesario lanzar el recálculo de una nueva conducción óptima se establecerán dos condiciones que deben ser cumplidas simultáneamente; por un lado que el retraso instantáneo acumulado supere un cierto umbral admisible, y por otro que sea posible la recuperación inmediata de retraso, ya que el hecho de superar el umbral de retraso admisible no es garantía de que se pueda comenzar a recuperar retraso. Por ejemplo, el umbral podría superarse durante un tramo de limitación temporal de velocidad.

Este hecho se muestra en la Figura 4-12, donde se ha simulado una conducción nominal entre Madrid y Zaragoza en la que, cuando fue diseñada offline, no existía una limitación temporal de velocidad a 200 km/h entre los puntos kilométricos 100 y 120, es decir, la planificación nominal de la conducción diseñada consistía un tramo de regulación de velocidad seguido de un tramo de deriva final (línea verde oscura punteada). No obstante, desde el momento en que el tren empieza a frenar para cumplir con dicha limitación de velocidad, el retraso del tren comienza a incrementarse (curva azul en la gráfica inferior de la Figura 4-12) llegando a superar el umbral de retraso máximo admisible durante el tramo de limitación temporal de velocidad. Ante esta situación, si se disparara el *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos en el preciso instante en que se superara el umbral de retraso se estaría

diseñando una nueva conducción con la que se recuperaría un retraso igual al retraso acumulado en ese momento, cuando lo necesario sería diseñar una nueva conducción capaz de recuperar un retraso igual al máximo retraso acumulado en el momento en que empieza a ser posible recuperarlo, que se produce al terminar el tramo de limitación temporal de velocidad.

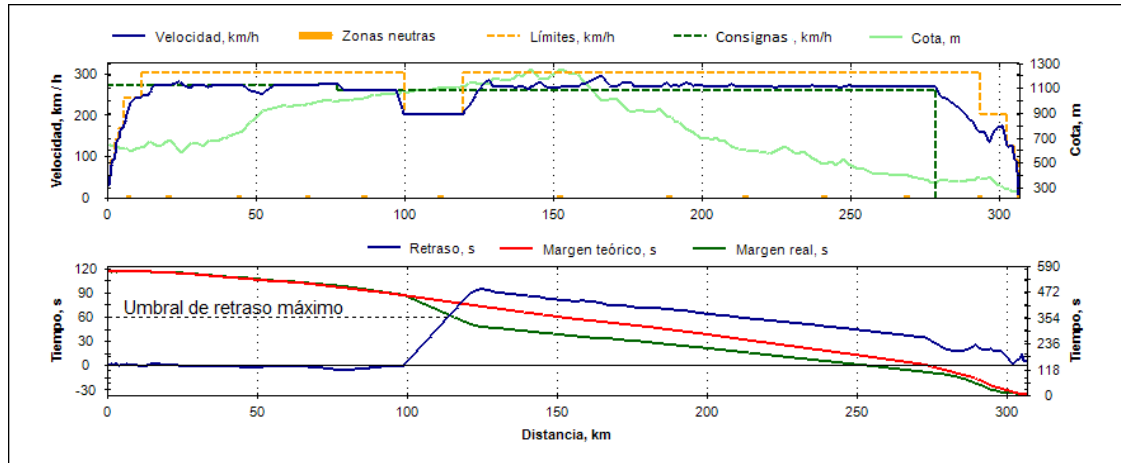


Figura 4-12. Conducción de recuperación de retraso eficiente.

Por tanto, para garantizar que el disparo del *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos se produce en el momento adecuado, además del umbral de retraso admisible se establecerá un umbral de retraso parcial recuperado, que verificará la posibilidad real de recuperar retraso. Así, en el caso de que una conducción haya superado el umbral de retraso admisible, el *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos se disparará cuando, a partir del momento en que el tren comienza a recuperar retraso a marcha tendida, el tiempo de retraso parcial recuperado supere al umbral de retraso parcial recuperado.

Teniendo en cuenta los dos umbrales definidos, la condición de disparo del *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos de recálculo de la nueva conducción manual estará gobernada por el diagrama de flujo de la Figura 4-13. En todo momento se estará supervisando el retraso instantáneo del tren. Si éste es menor que el umbral de retraso admisible, se seguirán las consignas de la conducción nominal diseñada offline. En cambio, si supera dicho umbral, el tren deberá adoptar la conducción a marcha tendida hasta que el tiempo de retraso parcial recuperado supere el umbral de retraso parcial recuperado, momento en que se disparará el *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos.

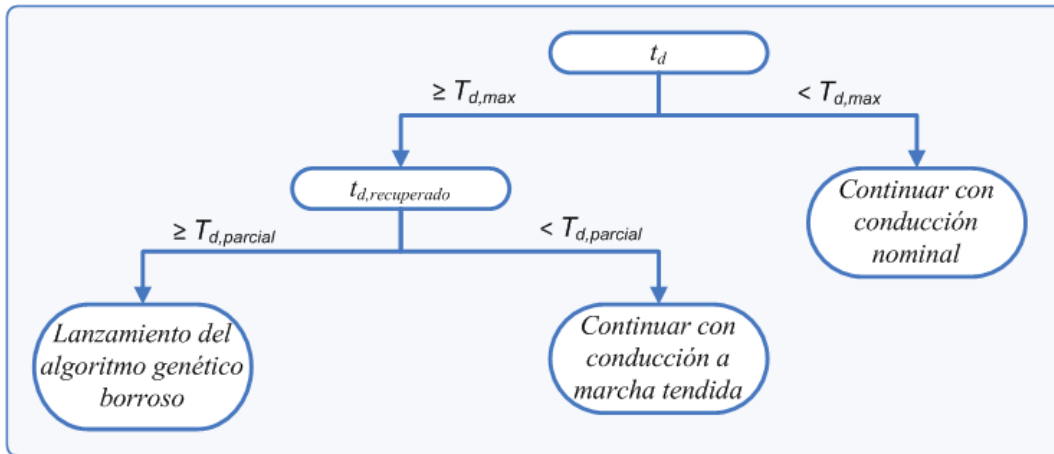


Figura 4-13. Diagrama de flujo para el lanzamiento del *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos de recálculo de la conducción eficiente en tiempo real.

Siendo $t_{d,recuperado}$ la variable que medirá el tiempo de retraso parcial recuperado, t_d el tiempo de retraso instantáneo, $T_{d,max}$ el tiempo umbral de retraso máximo admisible y $T_{d,parcial}$ el tiempo umbral de retraso parcial recuperado.

A pesar de que el diagrama indica que desde que el retraso instantáneo supera al tiempo umbral de retraso máximo admisible hasta el momento en que el retraso parcial recuperado supera al umbral de retraso recuperado mínimo admisible se aplicará conducción a marcha tendida, esto se cumplirá siempre que se respeten las restricciones operativas del servicio (límites de velocidad máxima).

La Figura 4-14 muestra un detalle del ejemplo anterior para ilustrar los umbrales de retraso admisible y de recuperación parcial de retraso.

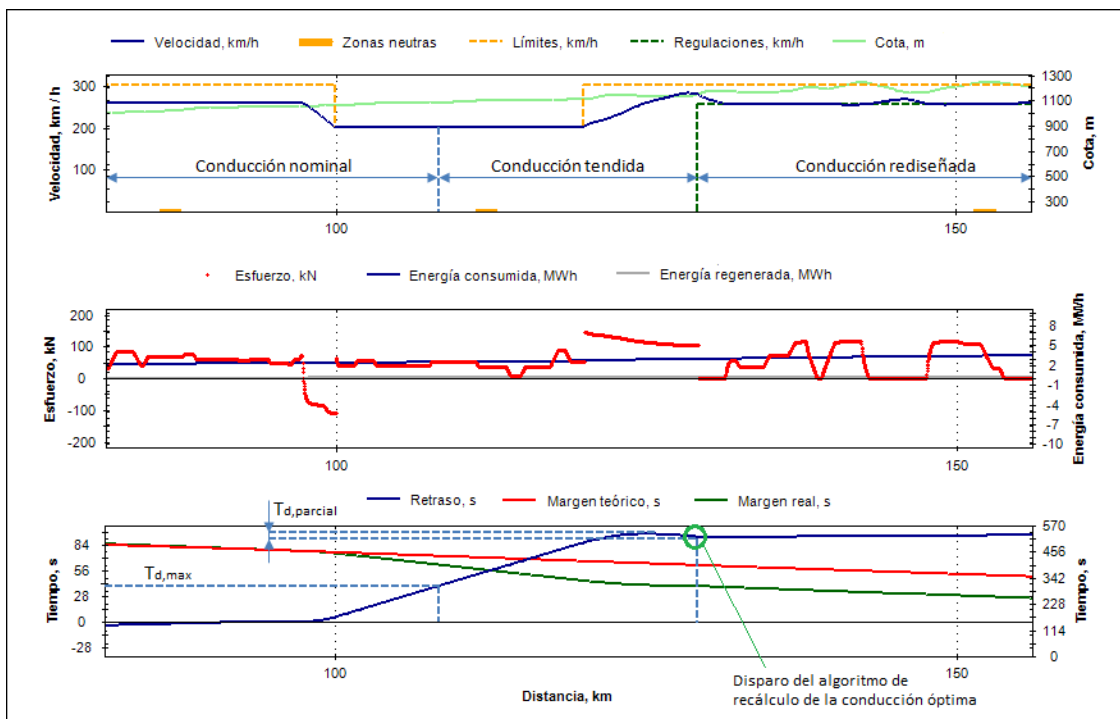


Figura 4-14. Detalle de umbrales de tiempo de retraso admisible y de recuperación parcial de retraso.

4.5. CASOS EJEMPLO

En este apartado se mostrarán dos casos prácticos para ilustrar los ahorros energéticos que se pueden alcanzar aplicando la metodología de regulación en tiempo real propuesta en este capítulo. Ambos casos ejemplos emplearán, como en capítulos anteriores, la línea Madrid-Zaragoza, en concreto el trayecto Calatayud-Zaragoza, y el tren de *Alta Velocidad* Talgo-Bombardier S-102, para los que se ajustó y validó el simulador en el capítulo 2.

En el primer caso ejemplo se analizará la conducción con un retraso producido a la salida de estación de 2 minutos, lo que provocará que la conducción a lo largo del trayecto deba ser más rápida que la conducción nominal. En el segundo caso ejemplo se analizará un servicio que a pesar de realizar una salida puntual según el horario comercial, sufre un retraso de 1 minuto durante el trayecto debido a un límite de velocidad temporal no existente en el momento en que se diseñó la conducción nominal en offline, lo que provoca una acumulación de retraso durante el mismo que deberá ser recuperado durante el resto del trayecto.

En ambos casos se compararán los resultados obtenidos al aplicar la estrategia de recuperación “inmediata” del retraso que suelen emplear los maquinistas con la estrategia resultante del regulador propuesto en este capítulo.

En ambos casos ejemplo los parámetros que definen el disparo del *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos serán los siguientes:

$$T_{d,max} = 60 \text{ s}$$

$$T_{d,parcial} = 3 \text{ s}$$

El número borroso triangular que modela la incertidumbre en la velocidad de regulación se ha definido como un número borroso con soporte $\Delta v_i = 4 \text{ km/h}$.

De la misma manera, el número borroso triangular que modela la incertidumbre en el instante de cambio de consigna por parte del maquinista se ha definido como un número con soporte $\Delta t_i = 4 \text{ s}$.

Por otro lado, el requisito de puntualidad a la llegada a la siguiente estación se definido mediante el nivel de necesidad de puntualidad, de valor $Np = 0,8$.

Por último, se estima un tiempo de ejecución del *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos de $T_{AEB} = 30 \text{ s}$.

Caso ejemplo 1

El trayecto comercial Calatayud-Zaragoza tiene un tiempo de recorrido comercial de 26:00, un tiempo de recorrido mínimo de 21:52 y un tiempo de holgura o margen teórico de 04:08, un 15,88% del tiempo de recorrido comercial.

En este caso ejemplo se supondrá que el tren sale de la estación de Calatayud con un tiempo de retraso de 2 minutos. Ante este escenario, se analizan las tres conducciones mostradas en la Figura 4-15:

- Conducción nominal, diseñada en offline (1).
- Conducción de recuperación “inmediata” del retraso y posterior adopción de la conducción nominal diseñada offline (2).
- Conducción eficiente diseñada con el método propuesto en este capítulo (3).

La conducción nominal diseñada offline es la conducción óptima obtenida según el *Algoritmo Evolutivo* descrito en el capítulo 2, y está formada por cuatro consignas; tres tramos iniciales de regulación de velocidad sin freno y un tramo final de deriva. Al producirse un retraso a la salida de Calatayud de 2 minutos, si el maquinista realizara la conducción nominal (1) llegaría a Zaragoza con los mismos 2 minutos de retraso, ya que la conducción nominal ha sido diseñada para el tiempo de recorrido comercial, de 26:00 (Tabla 4-1).

Al aplicar la conducción de recuperación “inmediata” de retraso (2), el maquinista sale de Calatayud a marcha tendida, y una vez recuperado todo el retraso adopta la conducción nominal anterior mediante un tramo de deriva. El tiempo que transcurre entre que el tren ha recuperado todo el retraso y se alcanza la consigna nominal, el tren estará circulando a una velocidad superior a la nominal, y por tanto llegará con un cierto tiempo de adelanto a Zaragoza. Como muestra la Tabla 4-1, el tiempo de recorrido de esta conducción es 23:20, 40s más rápida de lo necesario para recuperar los 2 minutos de retraso, lo que provocará un incremento de consumo adicional que se añadirá al incremento que ya se estaba produciendo por conducir a marcha tendida. Este hecho se aprecia en la Figura 4-16, que muestra la gráfica tiempo de recorrido - consumo energético neto en subestación de diferentes conducciones a lo largo del trayecto Calatayud-Zaragoza, además de las tres conducciones objeto de estudio en este caso ejemplo.

En cambio, al diseñar una conducción de recuperación de retraso con el método detallado en este capítulo, se consigue una conducción con un tiempo de recorrido de 23:52, con un consumo energético neto en subestación un 7,7% menor que el de la conducción de recuperación a marcha tendida.

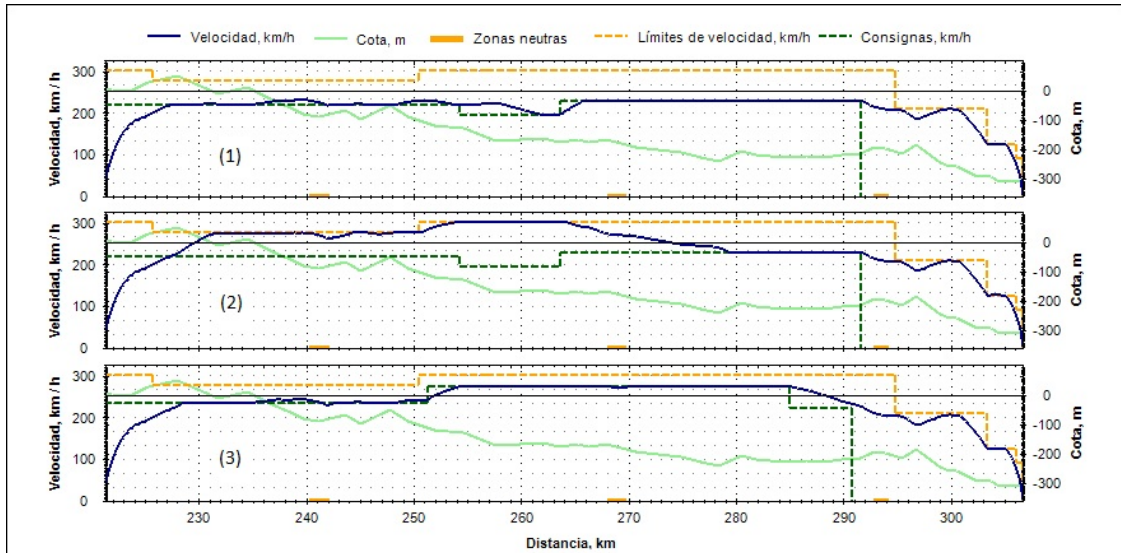


Figura 4-15. Perfiles de velocidad de la conducción nominal (1) y conducciones de recuperación de 2:00 a la salida de estación a marcha tendida (2) y aplicando el método propuesto (3) en el trayecto Calatayud-Zaragoza.

La Tabla 4-1 muestra los resultados de las tres conducciones anteriores, comparando los ahorros obtenidos gracias a aplicar la política de recuperación de retrasos eficiente. La conducción (3) consume un 7,84% menos de energía bruta en subestación. Al usar menos el freno que la conducción a marcha tendida, también regenera un 8,51% menos de energía, pero el resultado neto indica un consumo neto en subestación un 7,7% menor.

Conducción	Tiempo de recorrido (hh:mm:ss)	Consumo bruto en pantógrafo (MWh)	Energía regenerada en pantógrafo (MWh)	Consumo neto en pantógrafo (MWh)	Consumo bruto en SSEE (MWh)	Energía regenerada en SSEE (MWh)	Consumo neto en SSEE (MWh)
1	26:02	0,9820	0,1198	0,8623	1,0548	0,1130	0,9418
2	23:20	1,2252	0,1271	1,0981	1,3399	0,1201	1,2198
3	23:52	1,1459	0,1164	1,0295	1,2349	0,1099	1,1250
	Ahorro (%)	6,47%	8,44%	6,24%	7,84%	8,51%	7,77%

Tabla 4-1. Resultados de recuperación de retrasos aplicando conducción a marcha tendida y aplicando el método propuesto en el trayecto Calatayud - Zaragoza.

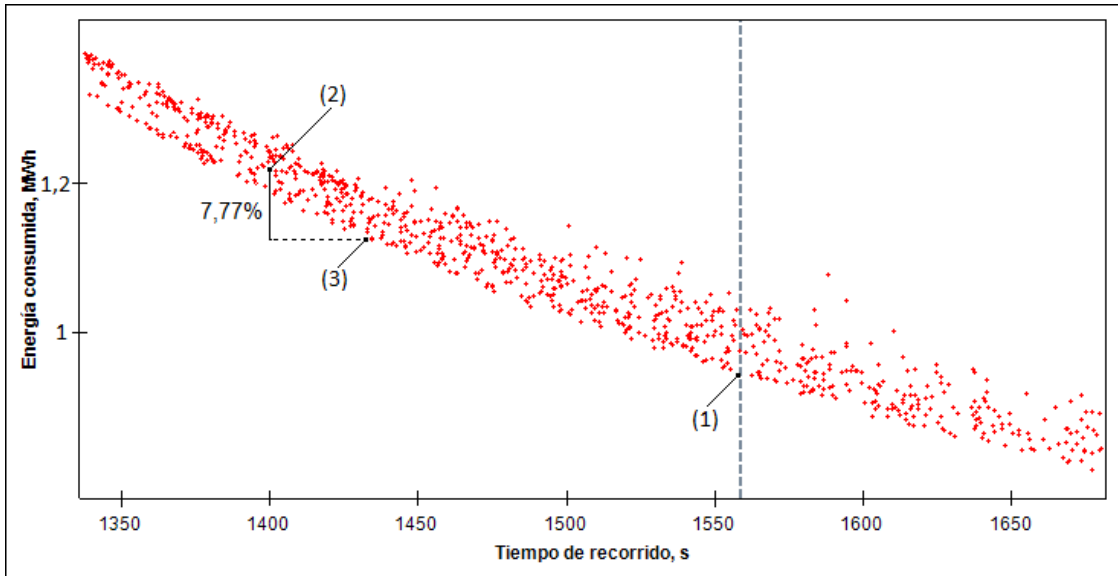


Figura 4-16. Tiempo de recorrido y consumo energético neto en subestación de la conducción nominal (1) y conducciones de recuperación de 2:00 a la salida de estación a marcha tendida (2) y aplicando el método propuesto (3) en el trayecto Calatayud-Zaragoza.

Caso ejemplo 2

Para el segundo caso ejemplo se partirá del mismo trayecto Calatayud-Zaragoza, con un tiempo de recorrido comercial de 26:00, un tiempo de recorrido mínimo de 21:52 y un tiempo de holgura o margen teórico de 04:08, un 15,88% del tiempo de recorrido comercial. La diferencia respecto al caso anterior consistirá en la existencia de una limitación temporal de velocidad a 165 km/h desde la salida de Calatayud hasta el punto kilométrico 235, lo cual provocaría, si no se tomara ninguna medida correctora sobre la conducción nominal, un retraso acumulado a la llegada a Zaragoza de 1:04.

Esta conducción se muestra en la Figura 4-17, donde la primera gráfica muestra es perfil de velocidad influido por el límite de velocidad temporal y las consignas de conducción nominal. En la gráfica tercera se aprecia el incremento de retraso durante el límite de velocidad temporal que no es recuperado una vez concluido éste, produciéndose la llegada a Zaragoza con un tiempo de retraso de 1:04.

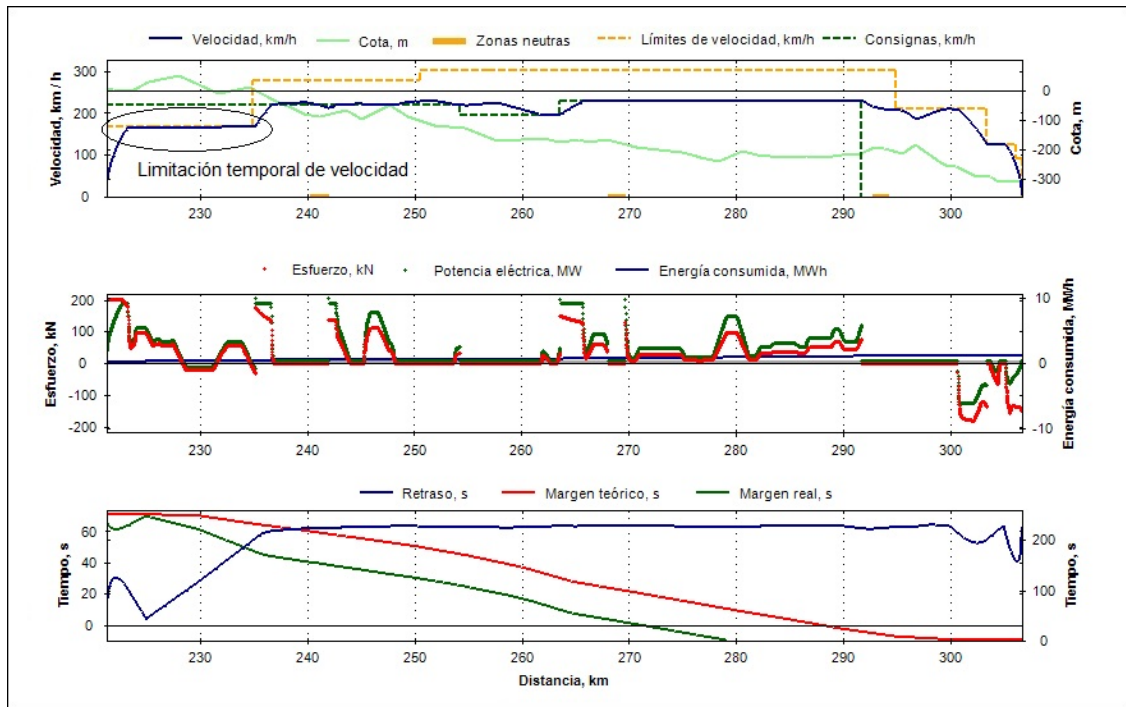


Figura 4-17. Perfil de velocidad, esfuerzo, consumo, retraso y márgenes teórico y real de la conducción nominal.

La Figura 4-18 muestra los perfiles de velocidad de la conducción nominal descrita anteriormente (1), la conducción de recuperación “inmediata” de retraso (2), y la conducción de recuperación eficiente del retraso mediante la aplicación del *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos propuesto (3).

La conducción de recuperación inmediata (2), una vez concluido el límite de velocidad temporal, adopta la marcha tendida hasta que el retraso acumulado durante dicho límite se hace nulo, momento en el que se recupera la conducción nominal.

En cambio, con la conducción de recuperación eficiente del retraso (3), una vez detectada la posibilidad de comenzar a recuperar retraso, el *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos calcula una nueva matriz de consignas con las que se consigue un ahorro energético neto en subestación del 6,71% respecto a la conducción de recuperación “inmediata” de retraso garantizando el nivel de puntualidad a la llegada a Zaragoza.

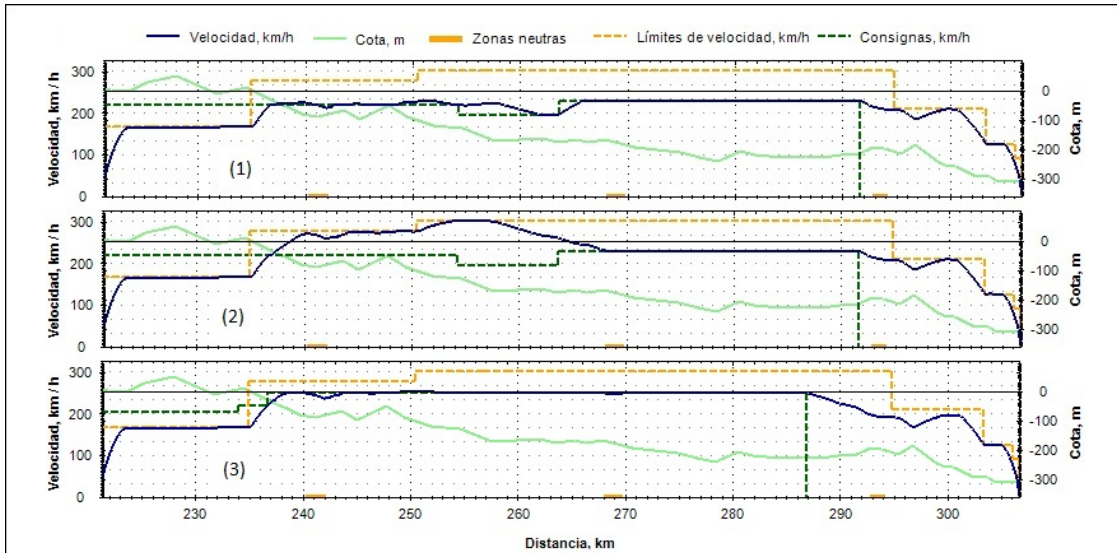


Figura 4-18. Perfiles de velocidad de la conducción nominal (1) y conducciones de recuperación por limitación temporal de velocidad, a marcha tendida (2) y aplicando el método propuesto (3) en el trayecto Calatayud-Zaragoza.

La Figura 4-19 muestra la gráfica tiempo de recorrido - consumo energético neto en subestación de diferentes conducciones a lo largo del trayecto Calatayud-Zaragoza, además de las tres conducciones objeto de estudio en este caso ejemplo.

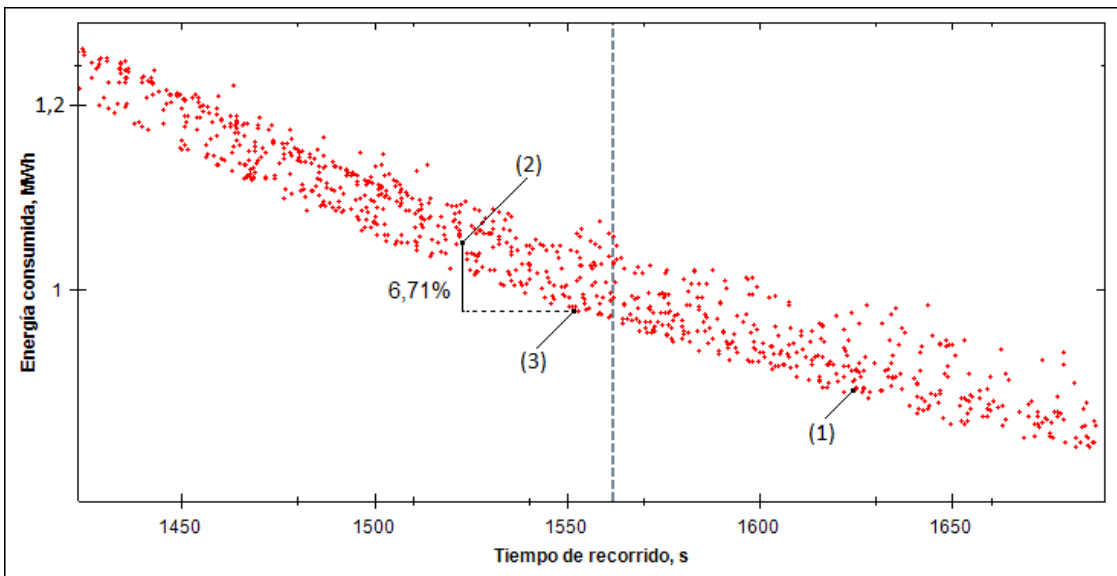


Figura 4-19. Tiempo de recorrido y consumo energético neto en subestación de la conducción nominal (1) y conducciones de recuperación inmediata de retraso (2) y aplicando el método propuesto (3) en el trayecto Calatayud-Zaragoza.

La Tabla 4-2 muestra los resultados obtenidos para las tres conducciones analizadas, comparando los ahorros obtenidos gracias a aplicar la política de recuperación de retrasos eficiente. La conducción (3) consume un 7,35% menos de energía bruta en subestación. Al usar menos el freno que la conducción a marcha tendida, también regenera un 12,66% menos de energía, pero el resultado neto indica un consumo neto en subestación un 6,71% menor.

Conducción	Tiempo de recorrido (hh:mm:ss)	Consumo bruto en pantógrafo (MWh)	Energía regenerada en pantógrafo (MWh)	Consumo neto en pantógrafo (MWh)	Consumo bruto en SSEE (MWh)	Energía regenerada en SSEE (MWh)	Consumo neto en SSEE (MWh)
1	27:04	0,9542	0,1303	0,8239	1,0105	0,1232	0,8873
2	25:23	1,0962	0,1344	0,9618	1,1788	0,1271	1,0518
3	25:51	1,0263	0,1172	0,9092	1,0922	0,1110	0,9812
	Ahorro (%)	6,37%	12,80%	5,47%	7,35%	12,66%	6,71%

Tabla 4-2. Resultados de recuperación de retrasos aplicando conducción a marcha tendida y aplicando el método propuesto en el trayecto Calatayud – Zaragoza con limitación temporal de velocidad.

Del estudio de los dos casos de ejemplo mostrados se desprende que el diseño de conducciones eficientes en tiempo real que recupere los retrasos acumulados puede suponer ahorros energéticos significativos respecto a las estrategias más conservadoras como la recuperación inmediata del retraso.

4.6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y APORTACIONES

En este capítulo se ha propuesto un método de regulación de la conducción en tiempo real que monitoriza el retraso instantáneo de una conducción a lo largo de un trayecto de un servicio comercial, y en caso de que se supere un umbral de retraso determinado, se rediseña en tiempo real una conducción eficiente que lo recupere. La nueva conducción consiste en un listado de consignas de alto nivel del mismo tipo que la conducción nominal de referencia, que recupera el retraso cumpliendo la puntualidad requerida a la llegada a la estación de destino de dicho trayecto.

El rediseño de las conducciones eficientes de recuperación de retrasos se realiza mediante la aplicación de un *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos que tiene en cuenta la incertidumbre asociada a la conducción manual. En concreto, se considera la incertidumbre en la aplicación de las consignas que definen cada conducción, la regulación de velocidad y el cambio de consigna, mediante el modelado borroso de los mismos. El requisito de puntualidad a la llegada se expresa como medida borrosa de necesidad.

El método de rediseño propuesto consigue un ahorro energético considerable respecto a la estrategia de recuperación “inmediata” del retraso, consistente en la conducción a marcha tendida hasta la recuperación total del retraso y la posterior aplicación de la conducción nominal diseñada offline.

Se han propuesto dos casos ejemplo con datos reales en el trayecto Calatayud-Zaragoza y con el tren Talgo-Bombardier S-102. En el primero de ellos se analiza un retraso producido a la salida de Calatayud de 2 minutos, logrando con el método propuesto en este capítulo un ahorro energético neto en subestación del 7,77% respecto a la estrategia de recuperación “inmediata” del retraso. En el segundo se analiza el retraso acumulado debido a la existencia de un límite de velocidad temporal no planificado al hacer el diseño nominal offline. Con el método propuesto se

consigue un ahorro energético neto en subestación del 6,71% respecto a la estrategia de recuperación “inmediata” del retraso.

Las aportaciones de originales correspondientes a este capítulo son las siguientes:

- Algoritmo de regulación basado en optimización en tiempo real mediante un *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos. La eficacia de las funciones de cruce y mutación permite su utilización en tiempo real, con un tiempo de ejecución alrededor de 30 s.
- Modelo de incertidumbre asociada a la ejecución manual de las consignas de conducción, en concreto a las consignas de velocidad de regulación y a la posición de los puntos de cambio de consigna. Este modelo se incorpora al algoritmo de recálculo de conducciones, imponiendo el requisito de puntualidad a la llegada a estación como una medida borrosa de necesidad.
- Estudio y valoración de la ineficacia asociada a la recuperación inmediata de retrasos habitual en líneas de *Alta Velocidad*, comparado con el procedimiento propuesto de recuperación basada en recálculo de la conducción óptima.

CONCLUSIONES, APORTACIONES, PUBLICACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. CONCLUSIONES Y APORTACIONES

El objetivo principal de esta tesis ha consistido en la operación eficiente de servicios ferroviarios de *Alta Velocidad* desde la fase de planificación y diseño de un servicio hasta la fase de explotación. Para conseguirlo, este objetivo fue abordado a través de tres objetivos particulares, desarrollados en los capítulos 2, 3 y 4 respectivamente:

- Diseño eficiente de conducciones manuales.
- Optimización energética de horarios comerciales con restricciones de puntualidad.
- Regulación eficiente de la conducción en tiempo real.

El primer objetivo particular de la tesis, el diseño eficiente de conducciones manuales eficientes en trayectos ferroviarios de *Alta Velocidad* para un tiempo de recorrido, ha sido abordado mediante un *Algoritmo Evolutivo* basado en un modelo de simulación detallado de conducciones manuales. Las aportaciones originales relacionadas con este objetivo han sido las siguientes:

Modelo de simulación de elevado nivel de precisión

Se ha elaborado un modelo de simulación para el diseño de las conducciones manuales de *Alta Velocidad* con un elevado nivel de precisión en el cálculo de tiempos de recorrido y consumos energéticos, que ha sido ajustado y validado con registros tomados de servicios comerciales. Este aspecto es especialmente importante en líneas de *Alta Velocidad* con compromisos de puntualidad elevados. Los algoritmos de cálculo basados en modelos de simulación utilizados en la bibliografía no alcanzan este nivel de precisión, y en general no han sido validados con medidas reales.

Las principales características incluidas en el modelo de simulación son las siguientes:

- Consideración de la longitud del tren, tanto en su influencia a la hora de calcular la pendiente media instantánea como la implicación con los límites de velocidad de la línea.
- Rendimientos de tracción y freno eléctrico ajustados con medidas reales.
- Modelado de las pérdidas en catenaria, que permiten calcular consumos brutos y netos (por regeneración) en subestaciones.
- Consideración de los túneles, en cuyo interior aumenta la resistencia al avance.
- Consideración de zonas neutras, a lo largo de las cuales no hay alimentación eléctrica. Además, se considera el esfuerzo de freno que el tren proporciona durante las mismas para la alimentación de sus equipos auxiliares mediante freno regenerativo.
- Modelado del perfil de la línea mediante radios de acuerdo entre tramos de pendiente constante, definidos como arcos de parábola de segundo grado y eje vertical (Figura 2-12). Esta característica, junto con la consideración de la longitud del tren, hacen posible el cálculo de la pendiente instantánea como la media ponderada de las pendientes de cada uno de los sectores en que se encuentre el tren, consiguiendo que la pendiente instantánea utilizada en el simulador varíe suavemente a lo largo del trayecto.
- Modelado del trazado en planta mediante rectas, curvas y clotoides para tener en cuenta la resistencia al avance debida al radio de curvatura. A pesar de ser muy inferior a las resistencias debidas a la pendiente y al avance por el alto valor de los radios de curvatura en las líneas de *Alta Velocidad*, cabe su consideración para aumentar la precisión del simulador.
- Modelo de conducción manual que incluye todas las estrategias de conducción manual eficiente utilizadas en la literatura, y adaptada a las posibilidades reales de actuación del maquinista.

El modelo de simulación ha sido ajustado y validado con medidas reales para garantizar que los cálculos de tiempo de recorrido y consumos energéticos de conducciones manuales son fiel reflejo de la realidad. La validación constató la precisión del simulador, logrando diferencias de tiempo de recorrido y consumos energéticos del orden del 0,75% y 0,35% respectivamente entre medidas reales y simuladas (Tabla 2-7).

Modelo de conducción manual en *Alta Velocidad*

Dada la sensibilidad de los resultados a la implementación final que los maquinistas hagan de las conducciones diseñadas, se ha establecido una estructura de conducción manual fácil de implementar, caracterizada por un conjunto de consignas de alto nivel definidas por estrategias de conducción eficiente. Estas estrategias consisten en una serie de regulaciones de velocidad sin freno seguidas de una deriva final. Mediante este modelo es posible incluir todas las demás estrategias de conducción eficiente utilizadas en la literatura, de manera que no se acota el espacio de búsqueda de conducciones eficientes y a la vez se asegura que el maquinista recibirá una lista de consignas sencilla de interpretar y ejecutar.

Modelo de optimización basado en un *Algoritmo Evolutivo*

Se ha propuesto un *Algoritmo Evolutivo* que permite minimizar el consumo en pantógrafo o subestación de una conducción manual dado un tiempo de recorrido objetivo. Está diseñado con funciones de cruce y mutación originales, que se han mostrado eficientes para la generación de nuevas conducciones. Mientras la función de cruce genera conducciones con tiempos de recorrido y consumos energéticos con gran dispersión para abrir el espacio de búsqueda, las conducciones mutadas se caracterizan por tener similar tiempo de recorrido y consumo energético que las conducciones de las que provienen.

El objetivo del *Algoritmo Evolutivo* es la determinación de la conducción manual cuyo tiempo de recorrido es igual al tiempo de recorrido objetivo y que consume la mínima energía.

El *Algoritmo Evolutivo* evalúa las conducciones manuales por medio de su función fitness, que tiene en cuenta tanto su tiempo de recorrido (penalizando las conducciones cuyo tiempo de recorrido difiere del tiempo de recorrido objetivo) como el consumo energético, que se desea minimizar.

Para acelerar la ejecución del *Algoritmo Evolutivo* se estima el tiempo de recorrido de las conducciones generadas aleatoriamente antes de ser simuladas, y en caso de que dicha estimación esté alejada del tiempo objetivo, se corrigen las velocidades de regulación de la matriz de consignas, logrando que la conducción generada tenga un tiempo de recorrido similar al tiempo de recorrido objetivo y así disminuir el número de iteraciones del *Algoritmo Evolutivo*. Esta función, junto con las funciones de cruce y mutación, han permitido tiempos de ejecución del algoritmo suficientemente bajos.

Verificación del método de diseño con medidas reales

Se ha mostrado en esta tesis por primera vez, con medidas reales y maquinistas profesionales no entrenados, el potencial de ahorro energético asociado al diseño

óptimo de la conducción manual en líneas de *Alta Velocidad* mediante consignas de conducción de alto nivel aplicadas manualmente.

El método propuesto ha sido aplicado en servicios comerciales reales, realizando diseños de conducciones manuales para sus diferentes trayectos y ensayándolas. Se comprobó que el modelo de conducción propuesto resultó de fácil implementación por parte de los maquinistas, que no precisaron entrenamiento previo para aplicar con precisión las diferentes consignas. Este enfoque tiene indudables ventajas frente a otros empleados por operadoras ferroviarias basados en ensayos de prueba y error.

Por otro lado, dada la tendencia de los maquinistas de los servicios de *Alta Velocidad* a realizar conducciones más rápidas de lo necesario, se ha confirmado el potencial de ahorro gracias al diseño de conducciones eficientes. En concreto, el ahorro medio obtenido fue de un 22,80% para el tramo Madrid-Guadalajara-Calatayud-Zaragoza, y de un 19,13% para el tramo en sentido inverso para las condiciones en que se realizaron los ensayos. La aplicación de conducciones guiadas no solo tiene la ventaja de reducir el consumo energético, sino también de homogeneizar la conducción de los maquinistas, que en la actualidad presenta una dispersión elevada.

El segundo objetivo particular de la tesis, la optimización energética de horarios comerciales con restricciones de puntualidad, ha sido abordado mediante un modelo de optimización bajo incertidumbre, cuyo objetivo es la minimización del consumo energético global del servicio imponiendo requisitos de puntualidad en cada una de sus paradas. Las aportaciones originales relacionadas con este objetivo han sido las siguientes:

Modelo de diseño conjunto del horario comercial y la conducción eficiente

Se ha propuesto un modelo de diseño conjunto para obtener tanto el horario óptimo como la conducción óptima a implementar en cada uno de los trayectos que componen un servicio comercial. Este enfoque conjunto tiende a asignar mayores holguras de tiempo a los trayectos en los que la conducción económica es más eficiente, maximizando el ahorro total por conducción y por horario y minimizando el consumo total del servicio.

Formulación y resolución del problema de optimización de horarios ferroviarios como un modelo de programación matemática borrosa.

Para modelar la incertidumbre asociada a los retrasos producidos durante la explotación de un servicio comercial se ha propuesto un modelo original de programación matemática borrosa, que considera los retrasos como números borrosos originados en la salida de cada estación del servicio, lo que requiere un modelo borroso tanto de las restricciones del problema como de la función objetivo.

Modelado de la incertidumbre asociada a los retrasos mediante números borrosos, y expresión de los requisitos de puntualidad mediante la medida de necesidad de llegada puntual a estación.

El modelo de programación matemática borrosa propuesto incorpora las restricciones de puntualidad en la llegada a estación considerando la incertidumbre en la aparición de retrasos, lo que permite imponer niveles de puntualidad mediante medidas de necesidad de puntualidad a cada estación.

Modelado de la respuesta conductual del maquinista frente a retrasos en el cálculo del consumo que utiliza la función objetivo, y la incertidumbre asociada a dicha respuesta.

Además, se modela la respuesta conductual del maquinista ante escenarios con retraso. El comportamiento conservador del maquinista ante escenarios con retraso hace que este tipo de conducción consuma más energía que la conducción óptima para el mismo tiempo de recorrido. Este incremento de energía es modelado como una función dependiente del tiempo de retraso recuperado durante el trayecto. La incertidumbre asociada a dicho comportamiento de recuperación ante retrasos se incorpora al modelo como una función lineal de pendiente borrosa.

En resumen, el modelo de optimización borrosa minimiza el consumo energético de un escenario con retrasos teniendo en cuenta el comportamiento del maquinista ante dichos retrasos. La optimización de horarios de servicios comerciales mediante la distribución de tiempos de holgura es una herramienta que, unida a la utilización de conducciones manuales eficientes pueden proporcionar ahorros sustanciales en la explotación de los servicios ferroviarios de *Alta Velocidad*.

En el caso de aplicación del modelo propuesto se ha optimizado el horario comercial del servicio en operación 3113 entre Madrid y Barcelona con paradas en Calatayud, Zaragoza, Lérida y Tarragona respetando el tiempo de recorrido total y el tiempo de parada en cada estación, obteniendo un ahorro energético de un 6,67% para el escenario de retrasos base, lo que ratifica las ventajas de incorporar este método en el diseño de futuros horarios comerciales. Estos ahorros son atribuibles únicamente al rediseño del horario distribuyendo las holguras en los trayectos de forma óptima, ya que han sido calculados respecto del horario actualmente en servicio suponiendo conducciones eficientes.

El tercer objetivo particular de la tesis, la regulación de la conducción en tiempo real, ha sido abordado mediante un *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos para garantizar la puntualidad del servicio a la llegada a cada estación. En caso de que sea necesario, dicho algoritmo calcula una nueva conducción con la misma estructura que la nominal, y que recupere el retraso cumpliendo la puntualidad requerida. Del estudio de los dos casos de ejemplo mostrados se desprende que el diseño de conducciones eficientes en tiempo real que recupere los retrasos acumulados puede suponer ahorros energéticos significativos respecto a estrategias más conservadoras como la recuperación inmediata del retraso. Las aportaciones originales relacionadas con este objetivo han sido las siguientes:

Algoritmo de regulación basado en optimización en tiempo real mediante un *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos.

Se ha propuesto un método que monitoriza el retraso instantáneo de una conducción a lo largo de un trayecto de un servicio comercial, y en caso de que se supere un umbral de retraso determinado, se rediseña en tiempo real una conducción eficiente que lo recupere, a través de un *Algoritmo Evolutivo* con parámetros borrosos que tiene en cuenta la incertidumbre asociada a la conducción manual, y donde el requisito de puntualidad a la llegada se expresa como medida borrosa de necesidad. La eficacia del *Algoritmo Evolutivo* permite su utilización en tiempo real, con un tiempo de ejecución alrededor de 30 s.

Modelo de incertidumbre asociada a la ejecución manual de las consignas de conducción

Se ha modelado la incertidumbre asociada a la aplicación manual de las consignas que definen una conducción, en concreto de las velocidades de regulación y del retraso/adelanto en la aplicación del cambio de consigna, mediante números borrosos. Este modelo se incorpora al algoritmo de recálculo de conducciones, imponiendo el requisito de puntualidad a la llegada a estación como una medida borrosa de necesidad.

Estudio y valoración de la ineficacia asociada a la recuperación inmediata de retrasos habitual en líneas de *Alta Velocidad*

El método de rediseño propuesto se ha comparado con la estrategia de recuperación “inmediata” del retraso practicada habitualmente, consistente en la conducción a marcha tendida hasta la recuperación total del retraso y la posterior aplicación de la conducción nominal diseñada offline. El método propuesto consigue un ahorro energético considerable respecto a dicha estrategia de recuperación de retrasos.

Se han propuesto dos casos ejemplo con datos reales en el trayecto Calatayud-Zaragoza y con el tren Talgo-Bombardier S-102. En el primero de ellos se analiza un retraso producido a la salida de Calatayud de 2 minutos, logrando con el método propuesto en este capítulo un ahorro energético neto en subestación del 7,77% respecto a la estrategia de recuperación “inmediata” del retraso. En el segundo se analiza el retraso acumulado debido a la existencia de un límite de velocidad temporal no planificado al hacer el diseño nominal offline. Con el método propuesto se consigue un ahorro energético neto en subestación del 6,71% respecto a la estrategia de recuperación “inmediata” del retraso.

En resumen, esta tesis ha propuesto un método para reducir el consumo energético de servicios ferroviarios de *Alta Velocidad* desde la fase de planificación y diseño hasta la fase de explotación a través de tres modelos relacionados entre sí: un modelo de diseño eficiente de conducciones manuales, un modelo de optimización energética de horarios comerciales con restricciones de puntualidad y un modelo de regulación eficiente de la conducción en tiempo real.

Con cada uno de los modelos, usado de manera independiente, se consiguen ahorros energéticos considerables, pero la mayor ventaja reside en la posibilidad de

combinarlos, obteniendo un método global para mejorar la eficiencia de los servicios ferroviarios de *Alta Velocidad* operados en conducción manual.

5.2. PUBLICACIONES

Durante el desarrollo de los trabajos que han culminado en la elaboración de esta tesis se han realizado diversas Publicaciones y participaciones en Congresos, en particular:

Revistas de impacto

A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, C. Sicre, M. Domínguez, "Fuzzy optimal schedule of high speed train operation to minimize energy consumption with uncertain delays and driver's behavioral response", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. vol. 25, no. 8, pp. 1548-1557, Diciembre 2012.

C. Sicre, A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, P. Lukaszewicz, "Modeling and optimizing energy-efficient manual driving on high-speed lines", *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. vol. 7, no. 6, pp. 633-640, Noviembre 2011.

Otras revistas

Sicre, C., A. Fernández, A. P. Cucala, J.A. Jiménez, I. Ribera, and A. Serrano. 2010. "A Method to Optimise Train Energy Consumption Combining Manual Energy Efficient Driving and Scheduling." In *Computers In Railways XII. Computer System Design and Operation in Railways and Other Transit Systems*, 1:549–560.

C. Sicre, A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, L. Cano, "A computer tool for automatic braking distance calculation", *WIT Transactions on The Built Environment*. vol. 103, pp. 807-816, 2008.

Presentaciones en congresos

A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, C. Sicre, M. Domínguez, "Optimización de horarios para la mejora de la eficiencia energética y la puntualidad", VII Congreso de Innovación Ferroviaria. Zaragoza, España, 7-10 Mayo 2012.

A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, C. Sicre, J.A. Jiménez, "Present and future of ecodriving on spanish high speed trains", 7th World Congress on High Speed Rail - UIC HIGHSPEED 2010. ISBN: 9787894594891, Beijing, China, 6-9 Diciembre 2010.

C. Sicre, A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, N. Jiménez Redondo, I. Ribera, A. Serrano, "A method to optimise train energy consumption combining manual energy efficient driving and scheduling", 12th International Conference on Computer System Design and Operation in the Railway and other Transit Systems. COMPRAIL 2010. Beijing, China, 31 Agosto - 2 Septiembre 2010.

M. Domínguez, M. Peña, C. Sicre, "Distribución óptima de holguras de tiempo en horarios de trenes con restricciones de puntualidad", IX Congreso de Ingeniería del Transporte - CIT 2010. ISBN: 978-84-96398-41-2, pp. 62, Madrid, España, 7-9 Julio 2010.

C. Sicre, A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, J. Conrado, A. Serrano, "Modelado y validación de un simulador para el posterior diseño de la conducción manual de trenes en Alta Velocidad", IX Congreso de Ingeniería del Transporte - CIT 2010. ISBN: 978-84-96398-41-2, pp. 170, Madrid, España, 7-9 Julio 2010.

A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, C. Sicre, J.A. Jiménez, I. Ribera, A. Serrano, "Spanish high speed trains. Energy efficiency in operation: driving designs based on simulation", 11th UIC Sustainability Conference. Railways: Mobility for a sustainable future. Madrid, España, 16-18 Junio 2010.

A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, C. Sicre, J.A. Jiménez, I. Ribera, A. Serrano, "AVEdrive. Diseño sistemático de estrategias de conducción económicas en líneas de alta velocidad españolas", BcnRail, Salón Internacional de la Industria Ferroviaria. Barcelona, España, 30 Noviembre-3 Diciembre 2009.

A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, C. Sicre, J.A. Jiménez, I. Ribera, A. Serrano, J. Bolado, "efiTRANS. Optimización del consumo energético del tren Caf-Alstom S-120 en el tramo Plasencia de Jalón-Madrid", BcnRail, Salón Internacional de la Industria Ferroviaria. Barcelona, España, 30 Noviembre-3 Diciembre 2009.

C. Sicre, A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, L. Cano, "A computer tool for automatic braking distance calculation", XI International Conference on Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems - COMPRAIL2008. Universidad Castilla-La Mancha. ISBN: 9781845641269. Toledo, España, 15-17 Septiembre 2008.

5.3. TRABAJO FUTURO

Durante el desarrollo de la tesis se han identificado futuros campos de investigación para mejorar la eficiencia energética de los servicios ferroviarios de *Alta Velocidad*. A medida que crezca el volumen de tráfico de las líneas, cada vez será más necesario minimizar la dispersión en los tiempos de recorrido que hoy en día existen dada la ausencia de criterios homogéneos de conducción, donde cada maquinista aplica los suyos propios. A continuación se citan brevemente algunas líneas de continuación de los estudios realizados en esta tesis:

- Conforme siga aumentando la demanda de los servicios de *Alta Velocidad* habrá menores márgenes de tiempo entre servicios, lo que provocará que las perturbaciones que hoy en día no se propagan a servicios adyacentes, comiencen a hacerlo. Para entonces, cada vez serán más necesarios los sistemas de ATO adaptados *Alta Velocidad* donde desaparezca la incertidumbre asociada a la conducción manual.

- Como consecuencia del anterior punto, cada vez serán más necesarios los sistemas de regulación automática de la conducción desde el centro de control, donde se coordinen conjuntamente todos los servicios de una misma línea. Este tipo de sistemas están muy desarrollados en explotaciones metropolitanas, pero no en líneas de largo recorrido.
- Incorporación al modelo de regulación un modelo de incertidumbre asociado al umbral de retraso y a la decisión a partir de la cual se dispara el modelo de recálculo de la nueva conducción.
- Incorporación al modelo de optimización de horarios y de regulación en tiempo real de un modelo de retrasos bajo incertidumbre cuyo origen se produzca durante el recorrido. Este modelo puede tener especial importancia en recorridos muy largos sin paradas intermedias, como son algunos trayectos directos de *Alta Velocidad* en España.

Referencias

- Abrila, M., M. A. Salidoa, and F. Barber. 2008. "Distributed Search in Railway Scheduling Problems." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 21 (5): 744–755.
- Acikbas, S., and M.T. Soylemez. 2008. "Coasting Point Optimisation for Mass Rail Transit Lines Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms." *IET Electric Power Applications* 2 (3): 172–182.
- Adif. 2005. *Perfil Longitudinal, Planta y Esquema De Vías*.
- Albrecht, T., C. Gassel, A. Binder, and J. van Luipen. 2010. "Dealing with Operational Constraints in Energy Efficient Driving." In *IET Conference on Railway Traction Systems*, 1–7.
- Albrecht, T., S. Oettich, J. Allan, and R. J. Hill. 2002. "A New Integrated Approach to Dynamic Schedule Synchronization and Energy-saving Train Control." In *Computers in Railways VIII*, 847–856.
- Alves, F.T., and C.L. Pires. 2010. "Energy Saving Strategy in Sao Paulo Metro." In *IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010)*, 1–4.
- Amit, I., and D. Goldfarb. 1971. "The Timetable Problem for Railways." *Developments in Operations Research* 2: 379–387.

- Asnis, I.A., A.V. Dmitruk, and N.P. Osmolovskii. 1985a. "Use of the Principle of a Maximum for Solving a Problem of Energetically-optimum Control of the Movement of a Train." *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki* 25: 1644–1655.
- Asnis, I.A., A.V. Dmitruk, and N.P. Osmolovskii. 1985b. "Solution of the Problem of the Energetically Optimal Control of the Motion of a Train by the Maximum Principle." *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics* 25: 37–44.
- Avallone, E.A., T. Baumeister, A. Sadegh, and L.S. Marks. 2006. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. McGraw-Hill.
- Balaji, P.G., and D. Srinivasana. 2011. "Type-2 Fuzzy Logic Based Urban Traffic Management." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 24: 12–22.
- Barrero, R., X. Tackoen, and J. V Mierlo. 2010. "Stationary or Onboard Energy Storage Systems for Energy Consumption Reduction in a Metro Network." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F. Journal of Rail and Rapid Transit*: 207–225.
- Bellman, R. 1973. "A Note on Cluster Analysis and Dynamic Programming." *Mathematical Biosciences* 18: 311–312.
- Bellman, R. E., and R. Kalaba. 1964. *Dynamic Programming and Modern Control Theory*. Academic Press.
- Bellman, R.E., and L.A. Zadeh. 1970. "Decision-Making in a Fuzzy Environment." *Management Science* 17: 141–164.
- Bocharnikov, Y.V., A.M. Tobias, and C. Roberts. 2010. "Reduction of Train and Net Energy Consumption Using Genetic Algorithms for Trajectory Optimisation." In *IET Conference on Railway Traction Systems*, 1–5.
- Bocharnikov, Y.V., A.M. Tobias, C. Roberts, S. Hillmansen, and C.J. Goodman. 2007. "Optimal Driving Strategy for Traction Energy Saving on DC Suburban Railways." *IET Electric Power Applications* 1: 675–682.
- Boltyanskii, V.G., R.V. Gamkrelidze, and L.S. Pontryagin. 1956. "Towards a theory of optimal processes." *Reports Acad. Sci. USSR* 110.
- Van Breusegem, V., G. Campion, and G. Bastin. 1991. "Traffic Modeling and State Feedback Control for Metro Lines." *IEEE Transactions on Automatic Control* 36: 770–784.
- Bureika, G., R. Subacius, and M. Kumara. 2009. "Research on Energy Efficient of Rolling-stock Operation." In *6th International Scientific Conference TANSBALTICA 2009*, 28–32.

- Bussieck, M., T. Winter, and U. Zimmermann. 1997. "Discrete Optimization in Public Rail Transport." *Mathematical Programming* 79: 415–444.
- Bwo-Ren, K., C. Meng-Chieh, and L. Chun-Liang. 2009. "Block-Layout Design Using MAX-MIN Ant System for Saving Energy on Mass Rapid Transit Systems." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 10: 226–235.
- Campos, J., G. de Rus, and I. Barrón. 2009. "El Transporte Ferroviario De Alta Velocidad. Una Visión Económica."
- Carbone, A., F. Papa, and N. Sacco. 2012. "An Optimization Approach for Delay Recovery in Urban Metro Transportation Systems." In *Euro Working Group on Transportation 2012*. Genova, Italia.
- Carey, M. 1998. "Optimizing Scheduled Times, Allowing for Behavioural Response." *Transportation Research Part B: Methodological* 32B: 329–342.
- Carey, M. 1999. "Ex Ante Heuristic Measures of Schedule Reliability." *Transportation Research Part B: Methodological* 33: 473–494.
- Carey, M., and D. Lockwood. 1995. "A Model, Algorithms and Strategy for Train Pathing." *Journal of the Operational Research Society* 46: 988–1005.
- Chanas, S., and A. Kasperski. 2001. "Minimizing Maximum Lateness in a Single Machine Scheduling Problem with Fuzzy Processing Times and Fuzzy Due Dates." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 14: 377–386.
- Chanas, S., W. Ko Odziejczyk, and A. Machaj. 1984. "A Fuzzy Approach to the Transportation Problem." *Fuzzy Sets and Systems* 13: 211–221.
- Chanas, S., and D. Kuchta. 1998. "Fuzzy Integer Transportation Problem." *Fuzzy Sets and Systems* 98: 291–298.
- Chang, C.S., and C.M. Kwan. 2008. "Timetable Synchronization of Mass Rapid Transit System Using Multiobjective Evolutionary Approach." *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C-Applications and Reviews* 38: 636–648.
- Chang, C.S., and S.S. Sim. 1997. "Optimising Train Movements Through Coast Control Using Genetic Algorithms." *IEE Proceedings - Electric Power Applications* 144 (1): 65–73.
- Chang, C.S., and B.S. Thia. 1996. "Online Rescheduling of Mass Rapid Transit Systems: Fuzzy Expert System Approach." *IEE Proceedings - Electric Power Applications* 143 (4): 307–316.
- Chang, C.S., D.Y. Xu, and H.B. Quek. 1999. "Pareto-optimal Set Based Multiobjective Tuning of Fuzzy Automatic Train Operation for Mass Transit System." *IEE Proceedings - Electric Power Applications* 146 (5): 577–583.

- Chang, S.S.L. 1969. "Fuzzy Dynamic Programming and the Decision Making Process." In *Proceedings of the Third Princeton Conference on Information Science and Systems*, 200–203.
- Chang, Y.H., and Ch.H. Yeh. 2004. "A Multiobjective Planning Model for Intercity Train Seat Allocation." *Journal of Advanced Transportation* 38: 115–132.
- Cheng, J. 1997. "Analysis of Optimal Driving Strategies for Train Control Systems". Adelaide, Australia: University of South Australia.
- Cheng, J., and P.G. Howlett. 1992. "Application of Critical Velocities to the Minimisation of Fuel Consumption in the Control of Trains." *Automatica* 28: 165–169.
- Cheng, J., and P.G. Howlett. 1993. "A Note on the Calculation of Optimal Strategies for the Minimization of Fuel Consumption in the Control of Trains." *IEEE Transactions on Automatic Control* 38: 1730–1734.
- Ching Changa, S., and Y. Chung. 2005. "From Timetabling to Train Regulation. A New Train Operation Model." *Information and Software Technology* 47 (9): 575–585.
- Cicerone, S., G. D'Angelo, G. Di Stefano, D. Frigioni, and A. Navarra. 2009. "Recoverable Robust Timetabling for Single Delay: Complexity and Polynomial Algorithms for Special Cases." *Journal of Combinatorial Optimization* 18: 229–257.
- Coleman, D., P. Howlett, P. Pudney, Vu Xuan, and R. Yee. 2010. "Coasting Boards Vs Optimal Control." In *IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010)*, 1–5. Sydney, Australia.
- De Cuadra, F., A. Fernandez, J. de Juan, and M.A. Herrero. 1996. "Energy-saving Automatic Optimisation of Train Speed Commands Using Direct Search Techniques." In *Computers in Railways V. Railway Systems and Management*, 1:337–346.
- Cury, J.E., F.A.C. Gomide, and M.J. Mendes. 1980. "A Methodology for Generation of Optimal Schedules for an Underground Railway System." *IEEE Transactions on Automatic Control* AC-25: 217–222.
- D'Ariano, A., and T. Albrecht. 2006. "Running Time Re-optimization During Real-time Timetable Perturbations." In *Computers in Railways X. Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems*, 1:529–530. Southampton.
- D'Ariano, A., F. Corman, D. Pacciarelli, and M. Pranzo. 2008. "Reordering and Local Rerouting Strategies to Manage Train Traffic in Real Time." *Transportation Science* 42: 405–419.

- Dessouky, M., and R.C. Leachman. 1995. "A Simulation Modeling Methodology for Analyzing Large Complex Rail Networks." *Simulation Transactions of the Society for Modeling and Simulation International* 65 (2): 131–142.
- Domínguez, M., A. Fernández, A. P. Cucala, and P. Lukaszewicz. 2011. "Optimal Design of Metro ATO Speed Profiles for Reducing Energy Consumption." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F. Journal of Rail and Rapid Transit* 225: 563–574.
- Domínguez, M., A. Fernández, A. P. Cucala, and R.R. Pecharromán. 2012. "Energy Savings in Metropolitan Railway Substations Through Regenerative Energy Recovery and Optimal Design of ATO Speed Profiles." *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 9: 496–504.
- Van Dongen, L.A.M., and J.H. Schuit. 1989. "Energy-efficient Driving Patterns in Electric Railway Traction." In *International Conference on Main Line Railway Electrification*, 154–158.
- Dorigo, M., V. Vaniezzo, and A. Colorni. 1996. "Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 26: 29–41.
- Esveld, C. 2001. *Modern Railway Track*. 2nd ed. Delft.
- European Commission. 1996. "European Commission (1996a) Council Directive 96/48 EC of 23 July 1996 on the Interoperability of the trans-European High-speed Rail System." *Official Journal*: 0006–00024.
- Fay, A. 2000. "A Fuzzy Knowledge-based System for Railway Traffic Control." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 13: 719–729.
- Fischetti, M., and M. Monaci. 2009. "Light Robustness and Online Large-scale Optimizations." *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)* 5868: 61–84.
- Franke, R., M. Meyer, and P. Terwiesch. 2002. "Optimal Control of the Driving of Trains." *At - Automatisierungstechnik* 50: 606–613.
- Franke, R., P. Terwiesch, and M. Meyer. 2000. "An Algorithm for the Optimal Control of the Driving of Trains." In *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, 3:2123–2127.
- Gao, S., and Z. Zhang. 2009. "Multiplication Operation on Fuzzy Numbers." *Journal of Software* 4: 331–338.
- García, A. 2007. "Consumo De Energía y Emisiones Del Tren De Alta Velocidad En Comparación Con Otros Modos." *Anales De Mecánica y Electricidad* 84: 26–34.
- García, A., I. Barrón, F. Puente, and M.P. Martín. 2010. *La Alta Velocidad En España: Líneas y Trenes. Líneas Españolas De Alta Velocidad*. Vol. II.

- Ghoseiria, K., F. Szidarovszky, and M.J. Asgharpour. 2004. "A Multi-objective Train Scheduling Model and Solution." *Transportation Research Part B: Methodological* 38: 927–952.
- Gill, D.C., and C.J. Goodman. 1992. "Computer-based Optimisation Techniques for Mass Transit Signalling Design." *IEE Proceedings - Electric Power Applications* 139 (3): 261–275.
- Goldberg, D.E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co.
- Golovitcher, I.M. 2001. "Energy Efficient Control of Rail Vehicles." In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 658–663.
- Golshani, F., and T. Thomas. 1981. "Optimal Distribution of Slack-time in Schedule Design." *Traffic Engineering & Control* 22: 490–492.
- Goodman, C.J., L.K. Siu, and T.K. Ho. 1998. "A Review of Simulation Models for Railway Systems." In *International Conference on Developments in Mass Transit Systems*, 543:80–85.
- Grillo, D., C. Landi, M. Luiso, and N. Pasquino. 2006. "An On-board Monitoring System for Electrical Railway Traction Systems." In *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2306–2311.
- Gunselmann, W. 2005. "Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems." In *11th European Conference on Power Electronics and Applications*, 10–15.
- Han, S.H., Y.S. Byen, J.H. Baek, T.K. An, S.G. Lee, and H.J. Park. 1999. "An Optimal Automatic Train Operation (ATO) Control Using Genetic Algorithms (GA)." In *Proceedings of the IEEE Region 10 Conference (TENCON 99)*, 360–362.
- Hanaoka, S., and P. Kunadhamraks. 2009. "Multiple Criteria and Fuzzy Based Evaluation of Logistics Performance for Intermodal Transportation." *Journal of Advanced Transportation* 43: 123–153.
- Hansen, I.A., and J. Pachl. 2008. *Railway Timetable & Traffic*.
- Hee-Soo, H. 1998. "Control Strategy for Optimal Compromise Between Trip Time and Energy Consumption in a High-speed Railway." *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part A-Systems and Humans* 28: 791–802.
- Higgins, A., and E. Kozan. 1998. "Modeling Train Delays in Urban Networks." *Transportation Science* 32: 346–357.
- Higgins, A., E. Kozan, and L. Ferreira. 1996. "Optimal Scheduling of Trains on a Single Line Track." *Transportation Research Part B: Methodological* 30: 147–161.

- Higgins, A., E. Kozan, and L. Ferreira. 1997. "Heuristic Techniques for Single Line Train Scheduling." *Journal of Heuristics* 3: 43–62.
- Hiroyasu, O. 1988. "Automatic Train Operation System Based on Predictive Fuzzy Control." In *IEEE Proceedings of the International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications*, 485–489.
- Hofman, M., and L. Madsen. 2005. "Robustness in Train Scheduling. Tesis De Máster". Technical University of Denmark, DTU.
- Holland, J.H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press.
- Howlett, P.G. 1995. "Optimal Strategies for the Control of a Train." *Automatica*: 519–532.
- Howlett, P.G. 2000. "The Optimal Control of a Train." *Annals of Operation Research* 98: 65–87.
- Howlett, P.G., and A. Leizarowitz. 2001. "Optimal Strategies for Vehicle Control Problems with Finite Control Sets." *Dynamics of Continuous Discrete and Impulsive Systems Series B: Applications & Algorithms* 8: 41–69.
- Howlett, P.G., I.P. Milroy, and P.J. Pudney. 1994. "Energy-efficient Train Control." *Control Engineering Practice* 2: 193–200.
- Howlett, P.G., P.J. Pudney, and X. Vu. 2009. "Local Energy Minimization in Optimal Train Control." *Automatica* 45: 2692–2698.
- Hui-Jen, C., C. Chao-Shun, L. Chia-Hung, H. Ching-Ho, and H. Chin-Yin. 2008. "Design of Optimal Coasting Speed for Saving Social Cost in Mass Rapid Transit Systems." In , 2833–2839.
- Ichikawa, K. 1968. "Application of Optimization Theory for Bounded State Variable Problems to the Operation of Train." *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers* 11: 857–865.
- Isaai, M.T., A. Kanani, M. Tootoonchi, and Afzali H.R. 2011. "Intelligent Timetable Evaluation Using Fuzzy AHP." *Expert Systems with Applications* 38: 3718–3723.
- Jia, Li-Min, and Xi-Di Zhanga. 1994. "Distributed Intelligent Railway Traffic Control: A Fuzzy-decisionmaking-based Approach." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 7: 311–319.
- Jong, J.C. 2003. "Analytical Solutions for Predicting Train Coasting Dynamics." *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 4: 91–103.
- Jong, J.C., and E.F. Chang. 2005a. "Models for Estimating Energy Consumption of Electric Trains." *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 6: 278–291.

- Jong, J.C., and S. Chang. 2005b. "Algorithms for Generating Train Speed Profiles." *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 6: 356 – 371.
- Jovanovic, D., and P.T. Harker. 1991. "Tactical Scheduling of Rail Operations: The SCAN I System." *Transportation Science* 25: 46–64.
- Kaas, A.H., J. Allan, and R.J. Hill. 2000. "Punctuality Model for Railways." In *Computers in Railways VII*, 1:853–860. Southampton, UK.
- Katori, T., and T. Izumi. 2008. "A Production Train Diagram of Train Control to Save Power Consumption Used for Dynamic Programming." In *Computers In Railways XI. Computer System Design And Operation In The Railway And Other Transit Systems*, 1:359–367.
- Kemp, R. 2004. "Take the Car and Safe the Planet. Thought Trains Were Always 'Greener' Than Cars? Think Again." *IEE Power Engineer*.
- Khan, M.B., and X. Zhou. 2010. "Stochastic Optimization Model and Solution Algorithm for Robust Double-Track Train-Timetabling Problem." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 11: 81–89.
- Khmelnitsky, E. 2000. "On an Optimal Control Problem of Train Operation." *IEEE Transactions on Automatic Control* 45: 1257–1266.
- Kim, K., S. Oh, and M. Han. 2010. "A Mathematical Approach for Reducing the Maximum Traction Energy: The Case of Korean MRT Trains." In *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 3:2169–2173.
- Kim, S.W., H.B. Kwon, Y.G. Kim, and T.W. Park. 2006. "Calculation of Resistance to Motion of a High-speed Train Using Acceleration Measurements in Irregular Coasting Conditions." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F. Journal of Rail and Rapid Transit* 220: 449–459.
- Klir, G., and B. Yuan. 1995. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*.
- Ko, H., T. Koseki, and M. Miyatake. 2004. "Application of Dynamic Programming to Optimization of Running Profile of a Train." In *Computers In Railways IX. Computer System Design And Operation In The Railway And Other Transit Systems*, 103–112. UK.
- Ko, H., and M. Miyatake. 2006. "A numerical method for optimal operating problem of a train considering DC power feeding system." *IEEJ Transactions on industry applications (in Japanese)* 126: 1104–1112.
- Kondo, K. 2010. "Recent Energy Saving Technologies on Railway Traction Systems." *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 5: 298–303.

- Koseki, T. 2010. "Technologies for Saving Energy in Railway Operation: General Discussion on Energy Issues Concerning Railway Technology." *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 5: 285–290.
- Kraay, D., P.T. Harker, and B. Chen. 1991. "Optimal Pacing of Trains in Freight Railroads: Model Formulation and Solution." *Operations Research* 39: 82–92.
- Kraay, D.R., and P.T. Harker. 1995. "Real-time Scheduling of Freight Railroads." *Transportation Research Part B: Methodological* 29: 213–229.
- Kuriyama, M., S. Yamamoto, and M. Miyatake. 2010. "Theoretical Study on Eco-driving Technique for an Electric Vehicle with Dynamic Programming." In *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2026–2030.
- Kwan, C.M., and C.S. Chang. 2005. "Application of Evolutionary Algorithm on a Transportation Scheduling Problem - the Mass Rapid Transit." In *The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2:987–994.
- Kyung min, K., O. Suk-mun, and H. Moonseob. 2010. "A Mathematical Approach for Reducing the Maximum Traction Energy: The Case of Korean MRT Trains." In *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2182:2169–2173.
- Lancien, D., and M. Fontaine. 1981. "Computing Train Schedules to Save Energy." *Revue General Des Chemins De Fer* 100: 679–692.
- Landi, C., and M. Luiso. 2008. "A Remotely Controlled Onboard Measurement System for Optimization of Energy Consumption of Electrical Trains." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 55: 2250–2256.
- Law, A.M., and W.D. Kelton. 2000. *Simulation Modeling and Analysis*. Third edition. New York: McGraw-Hill.
- Leander, P., M. Lagos, M. Karlsson, and S. Rydberg. 2000. "Computer-aided Train Operation, CATO." In *Computers in Railways VII*, edited by J. Allan, R. J. Hill, C. A. Brebbia, G. Sciutto, and S. Sone, 1:425–434.
- Lechelle, S.A., and Z.S. Mouneimne. 2010. "OptiDrive: A Practical Approach for the Calculation of Energy-optimised Operating Speed Profiles." In *IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010)*, 1–8.
- Levinson, D., J. Michel Mathieu, D. Gillen, and A. Kanafani. 1997. "The Full Cost of High-speed Rail: An Engineering Approach." *The Annals of Regional Science* 31: 189–215.
- Li, Liang, Wei Dong, Yindong Ji, and Zengke Zhang. 2012. "A Minimal-energy Driving Strategy for High-speed Electric Train." *Control Theory and Applications* 10: 280–286.

- Liebchen, C. 2008. "The First Optimized Railway Timetable in Practice." *Transportation Science* 42: 420–435.
- Liebchen, M., M. Lübbecke, R. Möhring, and S. Stiller. 2009. "The Concept of Recoverable Robustness, Linear Programming Recovery, and Railway Applications." *Lecture Notes in Computer in Science (LNCS)* 5868/2009: 1–27.
- Lin, W.S., and J.W. Sheu. 2010. "Automatic Train Regulation for Metro Lines Using Dual Heuristic Dynamic Programming." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F. Journal of Rail and Rapid Transit* 224: 15–23.
- Lukaszewicz, P. 2000. "Driving Techniques and Strategies for Freight Trains." In *Computers in Railways VII*, 1065–1073. Bologna, Italy.
- Lukaszewicz, P. 2007. "A Simple Method to Determine Train Running Resistance from Full-scale Measurements." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F. Journal of Rail and Rapid Transit* 221: 331–337.
- Malavasi, G., P. Palleschi, and S. Ricci. 2011. "Driving and Operation Strategies for Traction-energy Saving in Mass Rapid Transit Systems." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F. Journal of Rail and Rapid Transit* 255: 475–482.
- Miyatake, M., and H. Ko. 2007. "Numerical Analyses of Minimum Energy Operation of Multiple Trains Under DC Power Feeding Circuit." In *European Conference on Power Electronics and Applications*, 1–10.
- Miyatake, M., and H. Ko. 2010. "Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption." *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 5: 263–269.
- Miyatake, M., and K. Matsuda. 2009. "Energy Saving Speed and Charge/Discharge Control of a Railway Vehicle with On-board Energy Storage by Means of an Optimization Model." *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 4: 771–778.
- Murata, S. 1998. "Optimally Regulating Disturbed Metro Traffic with Passenger Inconvenience in Mind." In *International Conference on Developments in Mass Transit Systems*, 86–91. Tokyo, Japan.
- Ning, B., T. Tang, Z.Y. Gao, F. Yan, F.Y. Wang, and D. Zeng. 2006. "Intelligent Railway Systems in China." *IEEE Intelligent Systems* 21 (5): 80–83.
- Ogasa, M. 2008. "Energy Saving and Environmental Measures in Railway Technologies: Example with Hybrid Electric Railway Vehicles." *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 5: 15–20.
- Peña, M.T., A. Fernández, A. P. Cucala, A. Ramos, and R.R. Pecharromán. 2011. "Optimal Underground Timetable Design Based on Power Flow for Maximizing

the Use of Regenerative-braking Energy.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 226 (4): 397–408.

- Pilo, E. 2003. “Diseño Óptimo De La Electrificación De Ferrocarriles En Alta Velocidad.”
- Pokorny, P. 2007. “Energy-efficient Train Control and Speed Constraints.” In *9th WSEAS International Conference on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering (MMACTEE 07)*, 166–171.
- Pokorny, P. 2008. “A Remark on Energy Optimal Strategies for a Train Movement.” *ANZIAM Journal* 50: 1–23.
- Poré, J. 2010. “ATO for Suburban and Main Lines.” *IRSE News*: 2–5.
- Pudney, P., and P. Howlett. 1994. “Optimal Driving Strategies for a Train Journey with Speed Limits.” *The Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics* 36: 38–49.
- Rahman, Z., K. Ehsani, and K.L. Butler. 2000. *An Investigation of Electric Motor Drive Characteristics for EV and HEV Propulsion Systems*.
- Ren, J., and T.B. Sheridan. 1994. “Optimization with Fuzzy Linear Programming and Fuzzy Knowledge Base.” In *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 2:1389–1393.
- Renfe. 2004. *A Toda Vela. Aprovechamiento Máximo De La Energía De Tracción*.
- Rezanova, N.J., and D.M. Ryan. 2010. “The Train Driver Recovery problem—A Set Partitioning Based Model and Solution Method.” *Computers & Operations Research* 37: 845–856.
- Rommelfanger, H. 1996. “Fuzzy Linear Programming and Applications.” *European Journal of Operational Research* 92: 512–527.
- Rongfang, L., and I.M. Golovitcher. 2003. “Energy-efficient Operation of Rail Vehicles.” *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 37: 917–932.
- Rossenber, R. 1998. “Deutsche Eisenbahnfahrzeuge Von 1838 Bis Heute.”
- Sahin, I. 1999. “Railway Traffic Control and Train Scheduling Based on Inter-train Conflict Management.” *Transportation Research Part B: Methodological* 33: 511–534.
- Sakawa, M., I. Nishizaki, and Y. Uemura. 2002. “A Decentralized Two-level Transportation Problem in a Housing Material Manufacturer: Interactive Fuzzy Programming Approach.” *European Journal of Operational Research* 141: 167–185.

- Seong Ho, H., B. Yun Sub, B. Jong Hyen, A. Tae Ki, L. Su Gil, and P. Hyun Jun. 1999. "An Optimal Automatic Train Operation (ATO) Control Using Genetic Algorithms (GA)." In *Multimedia Technology for Asia-Pacific Information Infrastructure*, 1:360–362.
- Sicre, C., A. P. Cucala, A. Fernández, and P. Lukaszewicz. 2011. "Modelling and Optimising Energy Efficient Manual Driving on High Speed Lines." *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 7: 633–640.
- Soujima, H., and K. Isoura. 2012. "Development of the Maglev System in Japan: Past, Present and Future." In *IEEJ International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, 1:8–11.
- Steiner, D.M., M. Klohr, and S. Pagiela. 2007. "Energy Storage System with Ultracaps on Board of Railway Vehicles." In *European Conference on Power Electronics and Applications*, 1–10.
- Tanaka, H., and K. Asai. 1984. "Fuzzy Linear Programming Problems with Fuzzy Numbers." *Fuzzy Sets and Systems* 13: 1–10.
- Vašak, M., M. Baotić, N. Perić, and M. Bago. 2009. "Optimal Rail Route Energy Management Under Constraints and Fixed Arrival Time." In *Proceedings of the European Control Conference*.
- Vasant, P., and N. Barsoumb. 2009. "Hybrid Genetic Algorithms and Line Search Method for Industrial Production Planning with Non-linear Fitness Function." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22: 767–777.
- Wang, L., Y. Qin, J. Xu, and L. Jia. 2012. "A Fuzzy Optimization Model for High-Speed Railway Timetable Rescheduling." *Discrete Dynamics in Nature and Society*.
- Wang, Y., B. Ning, F. Cao, B. De Shutter, and T. van den Boom. 2011. "A Survey on Optimal Trajectory Planning for Train Operations." In *IEEE International Conference on Service Operations, Logistics, and Informatics (SOLI)*, 589–594.
- Wang, Z., Y. Wang, and L. Jia. 2005. "Study on Simulation of High-speed Automatic Train Operation Based on MATLAB." *International Journal of Heavy Vehicle Systems* 12: 269–281.
- Weidong, J., L. Chongwei, H. Fei, and J. Fan. 2000. "A Study on Intelligent Computation of Methods of Optimization Operation for Train." In *Proceedings 2000 International Workshop on Autonomous Decentralized System*, 97–102.
- Wong, K.K., and T.K. Ho. 2004a. "Coast Control for Mass Rapid Transit Railways with Searching Methods." In *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 151:365–376.
- Wong, K.K., and T.K. Ho. 2004b. "Dynamic Coast Control of Train Movement with Genetic Algorithm." *International Journal of System Science* 35: 835–846.

- Yang, L., Z. Gao, and K. Li. 2010. "Passenger Train Scheduling on a Single-track or Partially Double-track Railway with Stochastic Information." *Engineering Optimization* 42: 1003–1022.
- Yang, L., K. Li, and Z. Gao. 2009. "Train Timetable Problem on a Single-line Railway with Fuzzy Passenger Demand." *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 17: 617–629.
- Yasukawa, S., S. Fujita, T. Hasebe, and K. Sato. 1987. "Development of an On-board Energy Saving Train Operation System for the Shinkansen Electric Railcars." *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute* 28: 54–62. 3137245.
- Zadeh, L. A. 1965. "Information and Control." *Fuzzy Sets* 8: 338–353.
- Zadeh, L. A. 1973. "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-3* 1: 28–44.
- Zimmermann, H.J. 1976. "Description and Optimization of Fuzzy Systems." *International Journal of General Systems* 2: 209–215.
- Zweig, S. 1938. *Magallanes, El Hombre y Su Gesta*.