

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

Instituto de Investigación Tecnológica

Conducción eficiente de trenes metropolitanos con ATO

Tesis para la obtención del grado de Doctor

Directores: Prof. Dr. D. Antonio Fernández Cardador
Prof. Dra. Dña. Asunción Paloma Cucala García
Autor: Ing. Dña. María Domínguez Gago



Madrid 2013

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

TÍTULO: Conducción eficiente de trenes metropolitanos con ATO

AUTOR: María Domínguez Gago

DIRECTOR: Antonio Fernández Cardador y Asunción Paloma Cucala García

TUTOR-PONENTE: Antonio Fernández Cardador

DEPARTAMENTO: Instituto de Investigación Tecnológica

FACULTAD O ESCUELA: Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: José Germán Giménez Ortiz **Firma:**

VOCAL: Javier González Fernández **Firma:**

VOCAL: María Carmen Falvo **Firma:**

VOCAL: Fernando de Cuadra García **Firma:**

SECRETARIO: Luis Rouco Rodríguez **Firma:**

Fecha de lectura: 10 de mayo de 2013

Calificación:

A ONE

Y

MARTA

Agradecimientos



azhar hashim
@azharhashim

Seguir

life is the train and not the station.. #quotes

La vida es el tren, no la estación. Pero la vida también la forman todas aquellas personas que se suben y bajan de tu tren en cada estación.

Quisiera que mi primer agradecimiento fuera para Yolanda González porque fue la primera que dirigió mi tren hasta dónde ha llegado hoy. Ella es la primera culpable de esta tesis. Por supuesto, gracias a Antonio Fernández y a Paloma Cucala por su confianza en mí desde el primer día y por haberme dado la oportunidad de aprender todo cuanto me han enseñado, que ha sido mucho, y de formar parte durante estos cinco años y medio del IIT. Gracias también a otros maestros de los que también aprendí: Piotr Lukaszewicz y Tad Gonsalves.

Gracias a Ale, siempre dispuesta a apartar la vista de su camino para ayudarte a seguir el tuyo. Gracias a toda la gente de Quintana: a Eduardo, Paco, Nacho, Lukas, Rafa, Esther, Enrique, Maite..., a los adoptados Manolo y Álvaro y a la gente de Ricci: Nacho, Luis, Elena, Inma, Álvaro, Ramón, Carlos, William y también a Huguito. El IIT es un sitio especial gracias a todos ellos. Gracias por los desayunos, comidas, cañas, “investigaciones” fuera de currículo... Gracias a Caco por relativizarlo todo y ser tan buen compañero incluso en las situaciones más surrealistas o los lugares más lejanos. Pocos podrán decir que han estado en un tren descarrilado ☺

Gracias a la confianza que la gente de Metro de Bilbao, Barcelona y Madrid, Dimetronic y Bombardier han puesto en nosotros para realizar los trabajos que han dado lugar a esta tesis.

No quiero olvidarme de la estación de Tokio. Gracias al Prof. Miyatake por abrirme las puertas de su laboratorio, a la gente de Japan Rail por facilitar las visitas técnicas y a Rieko y Vanxay por su amabilidad, どうもありがとうございました. Y gracias a Diana, encantadora vía de escape, *muito obrigado!*

Gracias a mis amigos, viajeros permanentes en mi tren y que aligeran cualquier viaje por difícil o aburrido que sea: Alicia, Esther, JuanKr, Ingrid, JuanSe, Julián, Diana, Marta, César, Curro...

Mi mayor gratitud a mi familia, ejemplo de constancia, superación, esfuerzo, bondad y responsabilidad y auténticos responsables de todo cuanto he conseguido. Gracias al ejemplo de mis padres y mi hermana. A su entusiasmo y también al de Gabo. Y por supuesto gracias a Miguel, Nacho y Marta, capaces de aliviar cualquier tramo difícil del camino.

Gracias a mi compañero de cabina, David. Maquinista de mi tren cuando se me ha nublado la vista, mayor defensor de esta tesis a pesar de haber sido el principal motivo que nos ha tenido separados un año entero, increíble apoyo. Gracias a su paciencia, comprensión, optimismo, confianza en mí y a haber hecho de este también un proyecto suyo, esta tesis es hoy una realidad.

Nunca olvidaré el día en que mi sobrino Miguel me preguntó con su mirada más sincera; “*tía, ¿qué has inventado hoy?*”. Sirva esta tesis como agradecimiento para los que como él, siempre han creído en mí.

Nos vemos en un par de estaciones.

Extended Abstract

The objective of this document is to present an extended summary of the thesis “Efficient driving of metropolitan trains with ATO”. The original document was written in Spanish (*Conducción eficiente de trenes metropolitanos con ATO*).

Introduction

Energy efficiency in railway systems is nowadays a key topic under development and research in order to reduce energy consumption and costs since they have become a global concern. With regard to traffic operation, different technologies, developments or strategies are being researched and tested, both from the driving optimization and optimal use of regenerative braking points of view.

Metropolitan trains equipped with Automatic Train Operation systems (ATO) are operated between stations according to a set of speed commands received by radio or balises installed on the track. These commands correspond to one of a pre-programmed set of alternative ATO speed profiles per interstation distance. As a result, traffic control system performance and total energy consumption strongly depend on the off-line design of the ATO speed profiles. The ATO speed profile is selected online by the control system according to the required running time. When a train must be held up, from the user’s point of view a longer running time is preferred rather than a longer station waiting time. In addition, this control strategy involves energy savings because slower speed profiles result in fewer traction periods and therefore less consumption. However, the speed profile design usually considers running time and comfort criteria, leaving the energy consumption criteria in the background though important savings can be achieved.

If the ATO commands are transmitted to the train via encoded balises on the track with little channel capacity (bandwidth), only a few and discrete values can be sent and the solution space of every interstation is made up of a relatively small set of speed profiles. That allows an exhaustive simulation of all the combinations in order to find the optimal speed profiles. However, the new state-of-the-art signalling technologies permit a better bandwidth resulting in an exponential or even continuous, solution space, which makes impossible their exhaustive exploration. This calls for an automatic method for the optimal design of the ATO speed profiles.

In addition, the energy regeneration capability of the trains can produce important savings. Notwithstanding the above, in metropolitan railways the energy of regenerative braking is only used if there is another train powering at the same time in the same electrical section, otherwise this energy is spent heating resistor banks. Knowing that, different approaches are considered to take advantage of the regenerative energy, for instance, to equip the trains with energy storage devices.

An additional problem is that economic speed profiles are usually opposed to high regeneration capabilities. Therefore, the interaction and balancing of economic speed profiles and the maximization of the regenerative energy is a complex problem with many factors involved in which important savings can be achieved (10%-20%) without high investments.

With that motivation, this PhD thesis has been focused on the efficiency in railways operation from the point of view of driving in metropolitan systems with the following objectives.

Objectives

The purpose of this thesis is to address the development of design models for the efficient driving of metropolitan trains equipped with ATO systems. The aim is to reduce energy consumption, while maintaining and improving the current comfort and operation design requirements (especially in terms of running time and capacity).

The following points cover the objectives more specifically:

- 1) Development of models that simulate train movement, automatic driving and track characteristics, with the objective of analyzing under realistic conditions, the possibility of achieving savings, as well as the interdependence of the different models.
- 2) Development of an accurate simulator, good enough to be implemented in real situations, along with a validation procedure based on real measurements.
- 3) The design of optimal driving profiles based on the simulation of speed commands, along with a comparison with the current speed profile designs. Not only energy efficiency, but also comfort criteria are key factors that must be assured before implementation in the real system. A proper modeling for these comfort criteria, along with the simulator's accuracy, will minimize the number of tests to be

performed as well as the redesign of new driving profiles due to uncomfortable speed profiles under real circumstances.

- 4) Development of algorithms to automatically obtain optimized solutions, in order to perform an automatic design of speed profiles in moving block signaling systems.
- 5) Model on-board energy storage devices and power inverters at substations, as well as parameterization of energy regenerated thanks to them and the frequency of trains. Thus, the regenerative energy effect can be incorporated to the driving design in an easy way.

Efficient design of ATO speed profiles

It is shown in Chapter 2 how mathematical models have been applied in order to find speed profiles that optimize energy use, principally optimal control techniques. These approaches include simplifications in their track, trains, and driving models. This means that they are not appropriate for the optimal design of metro ATO speed profiles given the short interstations in metropolitan lines and the differences of a few seconds between the ATO profiles to be designed. Therefore, accurate models are needed and that is why approaches based on simulation are an alternative. They do not require simplifications and enable an accurate calculation of running times and energy consumption. A number of optimization techniques have been used in combination with simulation. However, these models cannot be implemented to solve the problem. The features of the ATO system considered make necessary a different approach which rather than using a continuous control curve, optimize the discrete configuration parameters of the equipment.

Chapter 2 is focused on the computer-aided design of a set of ATO speed commands between two metro stations. The variables taken into account are the configuration data of the ATO system, four parameters in the case study: coasting speed, re-motoring speed, speed holding value, and braking deceleration rate. The considered ATO system provides only certain discrete values for each parameter, resulting in a solution space of 156 alternative speed profiles per interstation, which makes possible the exhaustive and accurate simulation of all the feasible ATO speed profiles. Decision theory techniques can be directly applied to select a set of solutions per interstation (four in the case study), including operational, comfort, and energy consumption criteria. Thus, the obtained driving solutions are fully adjusted to the real features and capabilities of the ATO equipment in service.

The equations and algorithms that define the train motion and ATO control have been modeled and implemented in a very detailed simulator. This simulator includes four independent modules (ATO, motor, train dynamics, and energy consumption), an automatic generator of every possible profile and a graphical assistant for the selection of speed commands in accordance with decision theory techniques. The adjustment of simulation results depends on the accurate simulation of the complete journey of a train between two stations. The results have been compared with measured data in order to adjust and validate the simulator. A comparison of complete simulations and measured data was carried out. An average difference of 4.2% in traction energy and 1.0% in running times is obtained.

After calibration, the simulator was used in the design of a set of four alternative speed profiles per interstation for line 3 of the Madrid underground. The new speed profiles designed were implemented in the ATO equipment and are currently being used. Measurements were taken and the consumption of the old speed profiles compared with the current one. Up to 38% savings are achieved with the new nominal speed profile. The running times of designed nominal profiles are similar to the running times of the old profiles, so that, the commercial speed is not affected. On average, with the redesign of all the stations in line 3, a 13% saving is achieved with the new design.

After the implementation of the first proposal for the line, it was necessary to redesign only 8 speed profiles of 102, which means that it is not a trial and error procedure but a sound simulation approach. Special importance has been attached to comfort in the application to Metro de Madrid line. Until now, designed profiles were implemented and subsequently tested in service to check comfort so many times as necessary until finding the comfortable ones. Thanks to the definition of concrete criteria and the simulator, this trial and error procedure is avoided ensuring the implementation of only comfortable and economical profiles.

Energy savings through regenerative energy recovery

Likewise, it is interesting to take advantage of the energy regeneration capability of the trains since important savings are expected with the implementation of regenerative braking. Up to 40% of the consumed energy could be fed back to catenary and however, measurements show only 19% of recuperation. The amount of recovered energy depends on service frequency, train power profiles, electric network

configuration, rolling stock, line voltage, track profile and length of feed sections, and train auxiliary power

Designing economical speed profiles, demand is decreased but the regenerated energy too. The higher the speed of the train and, consequently, the energy demand, the higher the regeneration capability is. So, the tradeoff between efficient speed profiles and maximization of the regenerative energy is a complex problem. Therefore, the main objective of Chapter 3 is to design the optimal ATO speed profiles taking into account the regenerative energy and the total net energy consumption in substations. To this end, a network model for calculating the total energy recovered as well as a model of a train with an on-board energy storage device is presented to calculate a realistic network receptivity in contrast with other studies that assume non justified percentages of receptivity.

The power traction network model is defined by means of two coefficients: the recovery (*RC*) and the energy losses coefficient (*ELC*). They are obtained given the calculation of the energy consumption in substations of all the trains running the line in different scenarios. The scenarios represent particular electrical network configurations and trains traffic during a period of time.

An on-board energy storage device similar to the “MITRAC Energy Saver” of Bombardier has been modeled. In order to use a realistic initial charge of the on-board energy storage device at the beginning of each interstation, simulations with eight different initial charges have been carried. It is concluded that the final state of charge is independent of the initial one which is completely consumed starting up the train. The whole line has been then simulated obtaining a realistic initial charge for each interstation. These initial charges are used for the designs of ATO speed profiles in the scenarios with on-board energy storage device.

Given the traction energy demanded and the available regenerative energy by a train per interstation in a scenario, it is possible to calculate an estimation of the energy consumption of the train in substations. It results from taking into account the recovery of the regenerative energy by means of the *RC* and the *ELC*. This way, the network is considered apart and characterized and modeled by these coefficients in the scenario. As a result, the calculation of the energy consumption in substations of each train at each interstation does not correspond to a particular traffic situation but an average contribution of the train to the consumption in substations. It is calculated for one train but in a real situation of volume of traffic since the *RC* and *ELC* coefficients consider the whole system of traffic and substations. This way, the regenerative energy of other

trains is also taken into account. So that, even simulating a single train, it is possible to assess the potential savings in different scenarios to assess the achievable energy savings due to possible investments such as installing power inverters or storage devices and energy savings due to the optimal design of ATO speed profiles for each scenario. The possible changes regarding to the design of Chapter 2 of the set of optimal speed profiles in different scenarios due to the regenerative energy are analyzed.

Automatic design of speed profiles in CBTC systems

As mentioned before, the configuration variables of the ATO systems typically consist of four commands: coasting speed, re-motoring speed, speed holding value and braking deceleration rate. In most of the lines of the main metropolitan systems in Spain (Madrid, Barcelona and Bilbao) these commands are transmitted to the antenna located under the train via encoded balises on the track which permit a limited amount of data bits to be transmitted due to the channel capacity. Thus, only a few and discrete values of the commands can be sent providing each interstation with a relatively small solution space of speed profiles consisting of the combinations of these discrete values, which for the case study they are 156 as seen before. However, the new state-of-the-art of signalling technologies such as CBTC (*Communications-based train control*) permit a better communication capacity (bandwidth) with high-resolution train location determination, and bidirectional train-to-wayside data communications. More commands values can be sent resulting in an exponential solution space. However, the large number of unavailable solutions with the current commands and the benefit of using more combinations are evident. It is shown in the thesis that some of these new possible speed profiles are more efficient from the energy point of view (up to 20%) and are located precisely in some of the gaps of the current Pareto front.

Therefore, this calls for a new method for the optimal design of the ATO speed profiles without an exhaustive simulation of all the combinations. Some studies are already trying to find optimal driving in CBTC systems. However, a realistic ATO is not taken into account in these cases. In Chapter 4, a multi-objective evolutionary algorithm has been proposed to obtain the Pareto front based on the detailed simulation of the train equipped with a real ATO system. So, once again, the objective of the design of ATO speed profiles is not to find a unique optimum point but a set of profiles with different running time, that is, a multi-objective optimization problem.

Since the performance of different multi-objective algorithms has been tested in the literature being the *Multiobjective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) the best in covering the full Pareto front with a low computational time, it has been selected in this thesis for finding the Pareto front with the optimal ATO speed profiles of a real metropolitan line. MOPSO is an extension of the single objective *Particle Swarm Optimization* (PSO) algorithm.

The solution of the MOPSO algorithm has been compared with the Pareto front obtained by exhaustive simulation of the whole solution space in order to check the good performance of the algorithm. Moreover, the computation time of the exhaustive search for different sizes of the solution space has been compared with the computation time of the MOPSO solution. The former increases its time drastically when the size of the solution space increases while the time of the MOPSO algorithm remains approximately constant. Therefore, the use of the MOPSO algorithm is justified. The algorithm is able even to take into account only the comfortable speed profiles of the solution space.

The chapter 4 explains how a solution space is formed by different driving profiles achieved using several combinations of parameters. Sometimes it might be worth identifying the set of driving parameters to make a decision during the development. That is the reason for using Pareto's different fronts for each driving profile rather than Pareto's global front from the beginning.

Last, a sensitivity analysis has been provided, looking into the impact of the number of users, and therefore the train's total weight, on the results obtained, in other words, an assessment of the of the solutions robustness

Conclusions and contributions

It has been demonstrated that, in order to design and implement optimal speed profiles on real systems, it is requisite carrying out accurate calculations for the running time as well as the energy consumed by the train. The automatic driving using ATO devices leads to limitations and particularities that make it more difficult to develop a model, distancing it from more general approaches. The lack of particularized, automatic driving, metropolitan train models whose behavior has not been simplified, turns this particularized and accurate model an exceptional and outstanding contribution, specially. Real measurements back the proposed design, what becomes another contribution to this field.

Due to its significant impact on energy consumption, special effort has been provided on the modeling of train's performance depending on the speed parameter and the traction ratio. No outstanding contributions on this field d been done before.

Taking advantage of the combination of every available ATO command makes coming up with an optimal speed profile design possible. During the design, not only running time and energy consumption parameters have been considered, but also comfort criteria and minimum cornering speeds. These parameters have not been considered so far, and would definitely help to improve the user experience and to reduce unnecessary wear of rails and wheels. The results prove that, even after putting these new parameters into the equation, not only does the running time remain the same, but there is also an improvement in comfort, and it is feasible to meaningfully reduce the energy consumption with minimum investments by train operators.

The distribution network model developed to evaluate the influence of the regenerated energy is another unique contribution of this thesis. Setting up several traffic and distribution network scenarios helped to assess different ways of exploiting the energy available. According to the results obtained from the case study, even though taking advantage of the regenerative energy is one of the goals, first it is necessary to optimize the ATO speed profiles. The reasons at the base of this are the significant energy savings (6 to 11%) and the minimum investment required while maintaining the same quality of service.

With regard to potential energy savings as result of investments on the distribution network (i.e. providing power inverters in substations or on-board energy storage devices), according to the case study these measurements would only provide savings during the quiet time (5 to 6%), and would be of no benefit at all during peak times.

Beyond the results, the main contribution lies in the study method itself. It allows us to evaluate potential energy savings in substations. The amount of these savings depends on the manner in which the regenerated energy is exploited and reused by the trains during breaking.

At the time that this thesis is written, most of the Spanish metropolitan rail systems use signaling systems based on fixed block, eventually this system will be replaced by CBTC; the model consider in this thesis is valid for both of them.

After a thorough revision of the state of the art, almost every study considering CBTC is mainly focused on optimizing either the train's capacity, the regulation of the trains with the headway by the system, or do not consider ATO devices at all. Having said this, at this moment there are no studies addressing how to optimize speed

profiles, even though the CBTC system would allow forwarding to an ATO a large amount of speed commands. An evolutionary computation algorithm has been proposed to find the Pareto front while using optimized driving profiles. Based on real examples, it has come to the conclusion that the MOPSO-CD algorithm is good enough to obtain that Pareto front within a reasonable short time, even considering normal comfort and operation issues.

Last, it has been demonstrated the need for carrying out an analysis with different driving patterns, obtaining their corresponding Pareto fronts independently rather than the global one. In addition, sensitivity in relation to the weight of the train analysis has been performed to evaluate the robustness of the solutions to be implemented.

The main content of this thesis is gathered in the next list of publications:

- M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, T. Gonsalves, "Multi Objective Particle Swarm Optimization algorithm for the design of efficient ATO speed profiles in metro lines", Engineering Applications of Artificial Intelligence. (Under review).
- M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, R.R. Pecharromán, "Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. vol. 9, no. 3, pp. 496-504, Julio 2012.
- M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, P. Lukaszewicz, "Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. vol. 225, no. 5, pp. 463-474, September 2011

Resumen

La mayoría de los ferrocarriles metropolitanos modernos se conducen de manera automática mediante microcontroladores a bordo del tren conocidos como ATO (*Automatic Train Operation*). El sistema de regulación de tráfico cuenta con un conjunto de conducciones (marchas) preprogramadas por cada interestación, una de las cuales deberá ejecutar el ATO. En función del tiempo de recorrido deseado para el tren, el ATO recibe los parámetros que configuran una de las marchas en concreto. La selección o diseño de las marchas que conforman ese conjunto preprogramado se ha realizado tradicionalmente sin tener en cuenta criterios de eficiencia energética a pesar del importante potencial de ahorro que existe al ser el metro un sistema con altas frecuencias de funcionamiento. Además, el diseño óptimo de la conducción y las estimaciones de reducción de consumo asociadas a un rediseño de marchas se pueden ver fuertemente condicionados por el grado de aprovechamiento de la energía regenerada. Dicho aprovechamiento depende a su vez de la estrategia adoptada para la reutilización de la energía regenerada, como pueden ser acumuladores de energía o inversores de potencia en subestaciones.

En esta tesis se modelan con gran detalle tanto el movimiento del tren como el equipo ATO, además de un acumulador de energía embarcado. Gracias a registros tomados en funcionamiento normal de los trenes se comprueba la precisión conseguida en los tiempos de recorrido y consumo, lo que permite validar la herramienta de simulación en la que se han integrado los modelos. Se ha propuesto un procedimiento de diseño de las marchas óptimas mediante la combinación de todos los parámetros ATO disponibles para un caso estudio real. Se trata de un problema de optimización multiobjetivo en el que se ha buscado un compromiso entre los tiempos de recorrido y la energía consumida. El procedimiento de diseño de marchas propuesto se ha aplicado a varias líneas de Metro de Madrid, Bilbao y Barcelona. En Metro de Madrid se ha puesto en servicio en Línea 3, y en Metro de Barcelona está finalizando la implantación en Línea 2 y Línea 5. Los resultados muestran que sin degradar los tiempos de recorrido e incluso mejorando el confort del viajero, es posible disminuir el consumo significativamente sin necesidad de realizar grandes inversiones.

La mayor parte de los metropolitanos actuales, señalizados mediante *Fixed Block* (FBS), limitan el número posible de conducciones alternativas por capacidad de comunicación con el tren, lo que permite generar las conducciones óptimas mediante simulación exhaustiva. Sin embargo, cuando el sistema de comunicación con el tren permite el envío de un mayor número de valores de los parámetros de conducción,

como en los modernos sistemas de señalización CBTC, el espacio de soluciones aumenta enormemente dificultando ya encontrar las soluciones óptimas mediante simulación exhaustiva. Para estos casos se ha propuesto también un algoritmo de computación evolutiva que obtiene las conducciones óptimas de manera automática. Gracias a varios ejemplos reales, se ha podido concluir que el algoritmo es suficientemente adecuado para obtener dichos óptimos en tiempos razonables de ejecución, permitiendo incluso introducir las restricciones de confort y operativas para obtener marchas implementables en servicios reales.

Asimismo, se ha realizado una evaluación de los posibles ahorros de energía en la operación de una línea de metro teniendo en cuenta el aprovechamiento de la energía regenerada en los frenados para distintos escenarios de tráfico, y considerando la posible instalación de elementos de almacenamiento de energía o inversión de corriente. Para ello se ha desarrollado un modelo de red que calcula el balance energético global de la línea en subestaciones, y no de cada tren aislado, en función de los distintos escenarios de operación e infraestructura de red. Con el procedimiento propuesto se diseñan las marchas ATO óptimas teniendo en cuenta el aprovechamiento que se realiza de la energía regenerada por el tren. Además, el modelo propuesto permite evaluar qué tecnología de aprovechamiento de energía regenerada es más beneficiosa para el caso de estudio aplicado. Los resultados muestran que, antes de invertir en acumuladores o inversores, el rediseño de la conducción permite obtener importantes ahorros sin grandes inversiones.

Contenido

1	Introducción	9
1.1	Planteamiento del problema y motivación	10
1.2	Aportaciones de la tesis.....	14
1.3	Objetivos de la tesis	15
	1.3.1 Objetivo central de la tesis.....	15
	1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4	Estructura de la tesis y divulgación.....	18
1.5	Bibliografía.....	19
2	Diseño eficiente de marchas ATO	21
2.1	Introducción	25
2.2	Modelos	32
	2.2.1 Modelo de ATO.....	33
	2.2.2 Modelo del motor	39
	2.2.3 Dinámica del tren.....	42
	2.2.4 Modelo de consumo	48
2.3	Validación de los modelos y el simulador.....	53
	2.3.1 Caso ejemplo.....	54
	2.3.2 Registros embarcados.....	55
	2.3.3 ATO.....	56
	2.3.4 Motor.....	58
	2.3.5 Dinámica.....	59
	2.3.6 Consumo.....	60
	2.3.7 Modelo completo	60
2.4	Diseño de las marchas de regulación ATO	61
	2.4.1 Criterio de dominación.....	63
	2.4.2 Criterio de sensibilidad	64
	2.4.3 Criterio de distribución uniforme de tiempo	64
	2.4.4 Restricciones de confort	65
	2.4.5 Restricciones operativas.....	66
	2.4.6 Diseño de marchas de la Línea 3 de Metro de Madrid	66

2.4.7	Discusión	68
2.5	Resumen, conclusiones y aportaciones.....	70
2.6	Bibliografía	72
3	Aprovechamiento de la energía regenerada en la conducción económica	75
3.1	Introducción	79
3.1.1	Devolución de energía a la red.....	80
3.1.2	Sistemas de Acumulación	81
3.1.3	La conducción y el freno regenerativo.....	86
3.1.4	Desarrollo del capítulo	88
3.2	El modelo de red	89
3.2.1	Coeficiente de recuperación de energía RC_s	90
3.2.2	Coeficiente de pérdidas de energía ELC_s	91
3.2.3	Energía consumida por un tren en subestaciones ECS_s^t	92
3.3	Energía consumida por el tren en pantógrafo.....	93
3.3.1	Consumo de los sistemas auxiliares	93
3.3.2	Consideración de un acumulador de energía a bordo de los trenes.....	93
3.4	Diseño de marchas	95
3.5	Caso ejemplo	96
3.5.1	La masa que añade el acumulador de energía.....	97
3.5.2	Cálculo de la carga inicial	98
3.5.3	Escenarios	100
3.6	Resultados	101
3.6.1	El conjunto de marchas diseñadas.....	101
3.6.2	Ahorros potenciales	103
3.7	Conclusiones	107
3.8	Bibliografía	109
4	Búsqueda automática de marchas eficientes en sistemas CBTC	115
4.1	Introducción	117
4.1.1	Técnicas de optimización	122
4.1.2	Desarrollo del capítulo	127

4.2	Algoritmo MOPSO para el diseño de marchas.....	127
4.2.1	El problema.....	127
4.2.2	Formulación del algoritmo PSO.....	127
4.2.3	Funcionamiento para generar la curva de Pareto multiobjetivo (MOPSO)	129
4.3	Caso estudio y resultados	132
4.3.1	Pruebas y validación.....	132
4.3.2	Aplicación a una línea real de metro	134
4.3.3	Patrones de conducción	137
4.3.4	Robustez y análisis de sensibilidad.....	140
4.4	Parámetros continuos	143
4.5	Conclusiones	145
4.6	Bibliografía	147
5	Conclusiones, aportaciones y futuros desarrollos.....	151
5.1	Conclusiones y aportaciones	152
5.1.1	Modelado y diseño de la conducción	152
5.1.2	La energía regenerada	153
5.1.3	Diseño de marchas en sistemas CBTC.....	154
5.2	Publicaciones.....	155
5.2.1	Revistas con índice de impacto.....	155
5.2.2	Otras revistas.....	156
5.2.3	Presentaciones en conferencias	156
5.3	Sugerencias para futuros desarrollos	158
5.3.1	Modelado del tren	158
5.3.2	Modelado del equipo ATO FBS.....	158
5.3.3	Optimización de las inversiones en infraestructura de recuperación de energía	159
5.3.4	Nuevo modelo de control eficiente del tren en líneas CBTC.....	159
5.3.5	Mejoras en las herramientas desarrolladas de diseño de marchas.....	160

Índice de Figuras

Capítulo 1. Introducción

Figura 1.1: Evolución del Metro de Madrid	11
Figura 1.2: Conducción automática. Fuente: [González, 2005].....	12
Figura 1.3: Marcha entre dos estaciones.....	12
Figura 1.4: Transferencia de energía entre un tren que frena y otro que arranca en el mismo sector eléctrico. Fuente: [Peña-Alcaraz et al., 2012].	13

Capítulo 2. Diseño eficiente de marchas ATO

Figura 2.1: Diagrama de bloques del simulador.....	32
Figura 2.2: Conductor de metro manipulando la palanca del regulador de mando. (Fuente: www.metromadrid.es)	34
Figura 2.3: Ejemplo de marcha entre dos estaciones	36
Figura 2.4: Ejemplo de curva teórica de freno y curva seguida finalmente por el ATO	38
Figura 2.5: Ejemplo de curvas de esfuerzo y corriente máxima de los motores....	40
Figura 2.6: Familia de curvas de esfuerzo de tracción dependientes de la carga (Carga máxima, 50% de carga y tara). (Fuente: Alstom)	40
Figura 2.7: Diagrama de fuerzas en rampa	43
Figura 2.8: Transiciones entre pendientes. Fuente [Fomento, 2010]	44
Figura 2.9: Consideración de la pendiente media. Fuente: [Sicre Vara de Rey, 2013].....	45
Figura 2.10: Variación del rendimiento con la velocidad en registros tomados en la serie 3000 de Metro de Madrid.....	50
Figura 2.11: Curvas de esfuerzo del motor teóricas y obtenidas de registros para la serie 3000 de Metro de Madrid.....	50
Figura 2.12: Ventana de tiempo seleccionada para medir valores del rendimiento en función del %T	51

Figura 2.13: Cálculo del rendimiento para la serie 3000 de Metro de Madrid	52
Figura 2.14: Caso ejemplo considerado. Línea 3 de Metro de Madrid	54
Figura 2.15: Comparación de la señal de ATO simulada y registrada	56
Figura 2.16: Velocidad y señal de ATO registradas y simuladas. Comienzo de freno por reducción de velocidad máxima indicado en el gráfico	57
Figura 2.17: Esfuerzo medido y simulado	58
Figura 2.18: Marcha con consigna de deriva-remotor simulada y registrada. Simulación de la limitación de jerk sombreada	59
Figura 2.19: Comparación de simulaciones con distinta consideración del gradiente	59
Figura 2.20: Incompatibilidad de consignas de regulación y deriva-remotor en la misma marcha	62
Figura 2.21: Gráfico tiempo-consumo con el espacio de soluciones, curva de Pareto y representación del criterio de dominación	63
Figura 2.22: Criterios de sensibilidad y distribución uniforme de tiempo	64
Figura 2.23: Ejemplo de recorrido entre dos estaciones	66
Figura 2.24: Ejemplo de espacio de soluciones y diseño de marchas en la interestación de Villaverde Bajo Cruce a Ciudad de los Ángeles	67

Capítulo 3. Aprovechamiento de la energía regenerada en la conducción económica

Figura 3.1: Regeneración de energía con el frenado eléctrico del tren	79
Figura 3.2: Distintas posibilidades de aprovechamiento de la energía regenerada	80
Figura 3.3: Esquema del funcionamiento de un sistema DC con una unidad de almacenamiento integrada. Fuente: [Gunselmann, 2005]	82
Figura 3.4: Convertidor de tracción con acumulador de energía. Fuente: [Steiner et al., 2007]	83
Figura 3.5: Perfil de velocidad y fuerza entre estaciones y ciclos de funcionamiento de los acumuladores	84

Figura 3.6: Estado del arte en los diferentes elementos de la red y material móvil que influyen en el aprovechamiento de la energía regenerada	85
Figura 3.7: Flujos de energía en la red	89
Figura 3.8: Diagrama de flujo del modelo de consumo	94
Figura 3.9: Modelo del circuito del tren con un acumulador de energía embarcado	95
Figura 3.10: Perfil de velocidad y energía consumida y acumulada en el recorrido de Callao 1 situada en una pendiente casi constante	97
Figura 3.11: Perfil de velocidad, del terreno, energía consumida y acumulada en la interestación de San Cristobal 1	98
Figura 3.12: Escenarios 1, 2 (hora valle) y 8 (hora punta)	101
Figura 3.13: Espacio de soluciones de Delicias 2 en los escenarios 7 y 8	102
Figura 3.14: Energía consumida en subestaciones en horas valle	103
Figura 3.15: Energía consumida en subestaciones en horas punta	104
Figura 3.16: Ahorros que se pueden obtener introduciendo conducción económica en hora valle (izquierda) y punta (derecha)	105
Figura 3.17: Ahorros esperables mejorando la receptividad de la red en hora valle (izquierda) y punta (derecha)	106
Figura 3.18: Ahorros esperables con acumuladores embarcados en los trenes en hora valle (izquierda) y punta (derecha)	107

Capítulo 4. Búsqueda automática de marchas eficientes en sistemas CBTC

Figura 4.1: Representación de los distintos sistemas de ATP. Fuente: [González, 2005]	118
Figura 4.2: Espacio de soluciones de la interestación Almendrales 1	119
Figura 4.3: Técnicas de optimización	122
Figura 4.4: Técnicas de computación evolutiva. Fuente [Muñoz et al., 2008]	125
Figura 4.5: Algoritmo MOPSO-CD	131
Figura 4.6: Marcha tendida del caso ejemplo	132

Figura 4.7: Tiempos de ejecución del algoritmo MOPSO-CD y de simulación exhaustiva en función del número de soluciones	133
Figura 4.8: Espacio de soluciones y curva de Pareto del MOPSO-CD para una interestación.....	133
Figura 4.9: Espacio de soluciones y resultado del algoritmo MOPSO-CD con 80 partículas y 50 iteraciones en la interestación de San Cristobal 1	134
Figura 4.10: Curvas de Pareto obtenidas con el MOPSO-CD con 80 partículas y 50 iteraciones.....	135
Figura 4.11: Comparación de la nueva curva de Pareto y la actual en Almendrales 1.....	135
Figura 4.12: Espacio de soluciones de la interestación Ciudad de los Ángeles 2 y resultado del MOPSO-CD con 100 partículas y 30 iteraciones.....	136
Figura 4.13: Patrón de conducción T-D-BS	137
Figura 4.14: Conjuntos de curvas por patrones en Villaverde Bajo Cruce 1	138
Figura 4.15: Patrones de curvas que forman la curva de Pareto de la Figura 4.14	138
Figura 4.16: Curvas de Pareto de los diferentes patrones de conducción de la Figura 4.15.....	139
Figura 4.17: Ejemplos de patrones de conducción de la curva de Pareto. Patrón 1 (T-D-RM-D-BS) (izquierda) y patrón 6 (T-D-RM-T-BS) (derecha).....	140
Figura 4.18: Curvas de Pareto de los diferentes patrones de conducción de la Figura 4.15 y envolvente propuesta	140
Figura 4.19: Patrón de conducción T-D-RM-BS.....	141
Figura 4.20: Curvas de Pareto, inicialmente de patrón 5, para distintas cargas de viajeros.....	141
Figura 4.21: Marchas de la curva de Pareto de patrón 5 sobre espacio de soluciones total	142
Figura 4.22: Curvas de Pareto de patrón 2 para distintas cargas de viajeros	143
Figura 4.23: Espacio de soluciones de Lavapiés 1 y resultado del MOPSO-CD con parámetros continuos.....	144

1 Introducción

La tesis que se presenta aborda la operación eficiente de ferrocarriles metropolitanos desde el punto de vista de la conducción de los trenes, concretamente de la conducción automática. Se pretende reducir los consumos sin afectar a la calidad del servicio ni en tiempos de recorrido ni en confort, tratando incluso de mejorarla. Se tendrán en cuenta las distintas posibilidades de aprovechamiento del frenado regenerativo de los trenes, ya que puede afectar de manera importante al consumo total de una línea. Se propondrá un procedimiento de diseño de marchas óptimas de aplicación a la mayoría de líneas metropolitanas en servicio, señalizadas mediante *Fixed Block* (FBS), y un algoritmo de optimización automática con vista a sistemas CBTC (*Communications-Based Train Control*).

1.1 Planteamiento del problema y motivación

Es innegable la importancia del ferrocarril desde su creación hasta nuestros días en el desarrollo de la sociedad, en el crecimiento de las ciudades y en la mejora de las comunicaciones. Incluso hoy en día se postula como uno de los medios de transporte del futuro por su seguridad, su velocidad, su bajo precio en términos relativos, y por ser uno de los medios de transporte que producen menores emisiones de CO₂. El ferrocarril y las nuevas tecnologías han sufrido una evolución paralela siendo utilizadas éstas cada vez más para adecuar el funcionamiento del transporte ferroviario a las necesidades actuales de los viajeros.

Sin embargo, el ferrocarril no escapa a los problemas de hoy en día. La creciente preocupación por el medio ambiente [Akerlof et al., 2010], y la hipótesis de la existencia de un cambio climático como consecuencia de la irresponsabilidad del hombre en la gestión de los recursos energéticos [Liu and Wu, 2010], plantean un nuevo reto en el transporte. Para su viabilidad tanto económica como ambiental, todo medio debe avanzar en la línea de disminuir su consumo sin perder competitividad ni comodidad, tratando incluso de que ese consumo provenga de fuentes de energía sostenibles.

Los trenes metropolitanos aumentan su expansión día a día (véase como ejemplo el caso de Metro de Madrid en la Figura 1.1 [Metro de Madrid., 2009]), convirtiéndose en uno de los principales consumidores de energía de las ciudades, (si no el mayor [Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid., 2009]) y siendo el consumo energético el segundo gasto de las explotaciones por debajo del de personal [Metro de

Madrid., 2008]. Estos datos justifican, y en cierto modo estimulan, la búsqueda de estrategias y métodos que permitan ahorrar energía en el sector.

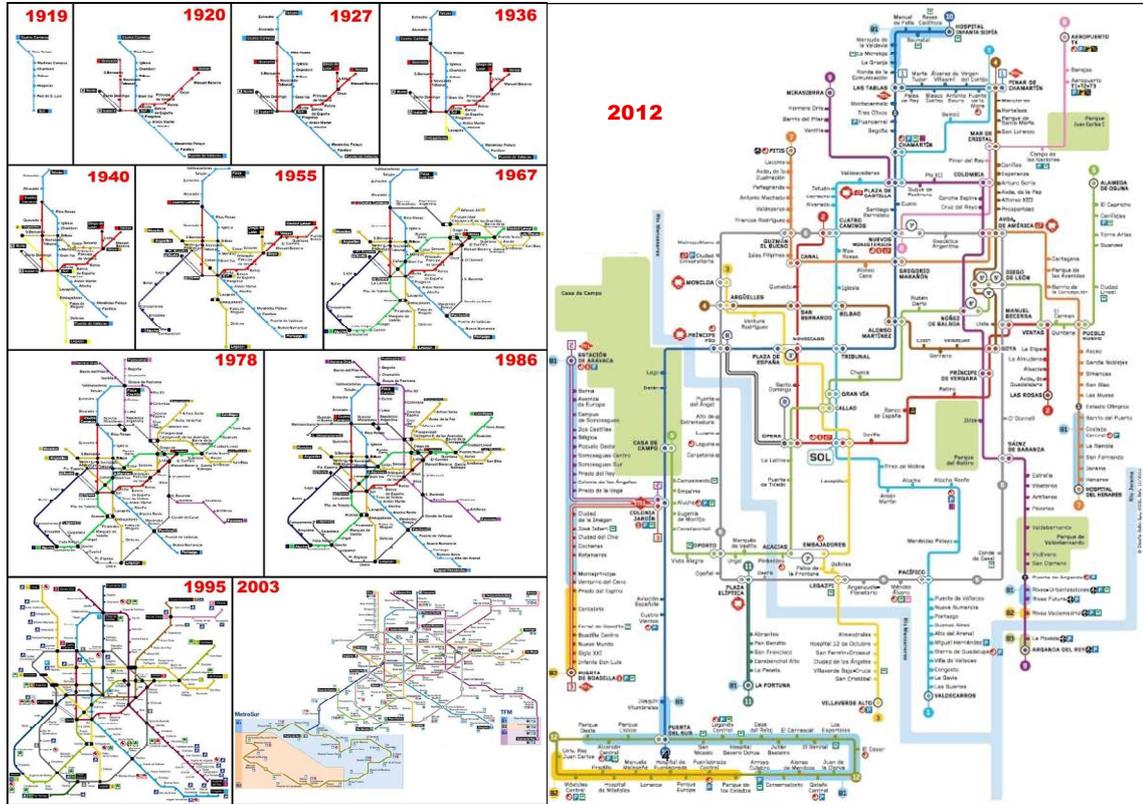


Figura 1.1: Evolución del Metro de Madrid

La mayoría de los ferrocarriles metropolitanos modernos ya cuentan con conducción automática mediante microcontroladores a bordo del tren conocidos como ATO [Kolsrud et al., 1976] [Poré, 2010] (*Automatic Train Operation*), limitándose la actuación del maquinista a la apertura y cierre de puertas y al arranque del tren (grado de automatización 2 – GoA 2 [Page, 2009]). Se distingue de esta manera de la operación sin conductor, en la que es necesaria la instalación de puertas automáticas en los andenes (GoA 3 o GoA 4 [Page, 2009]). Los sistemas ATO/ATP reciben a través de balizas fijas en la vía, por cable radiante o por radio [IEEE, 2004], distintos parámetros de configuración enviados desde el centro de control dependiendo del tiempo de recorrido necesario (ver Figura 1.2). La función del ATP (*Automatic Train Protection*) es supervisar el funcionamiento del ATO de manera que siempre se cumplan las condiciones de seguridad ya que el ATO será el encargado de conducir el tren. En función de los parámetros recibidos el ATO ejecutará una marcha u otra del

conjunto de marchas preprogramadas para cada interestación, entendiendo como marcha un perfil de velocidad que el tren sigue entre cada dos estaciones, y que lleva asociado un tiempo de recorrido y un consumo determinado (Figura 1.3). El diseño de dicho conjunto de marchas se ha realizado tradicionalmente en base a criterios operacionales (fundamentalmente tiempos de recorrido) y de confort, sin tener en cuenta criterios de eficiencia energética, a pesar del importante potencial de ahorro que existe al ser el metro un sistema con altas frecuencias de funcionamiento.

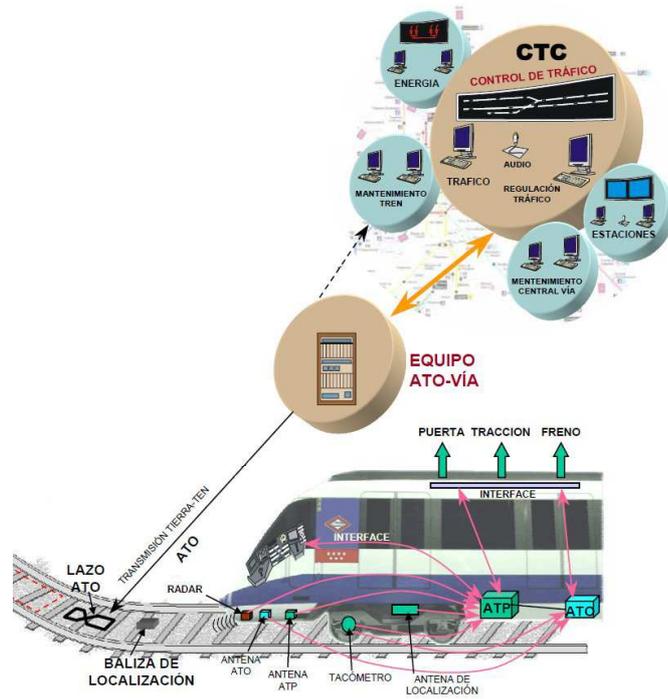


Figura 1.2: Conducción automática. Fuente: [González, 2005].

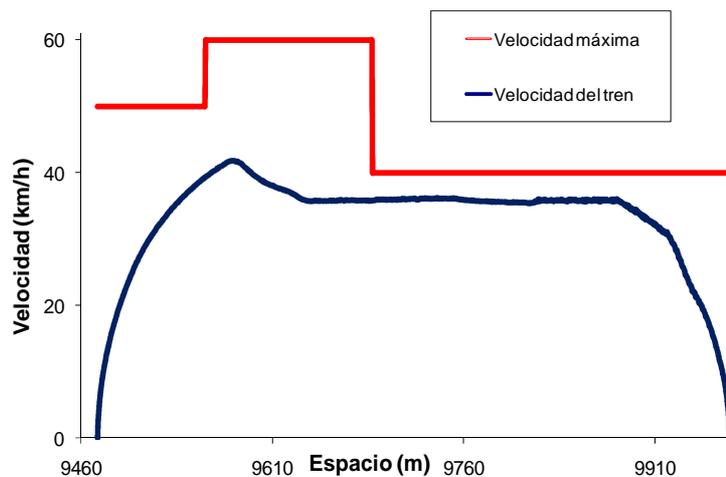


Figura 1.3: Marcha entre dos estaciones.

Para un diseño óptimo en interestaciones metropolitanas cortas se necesita una precisión muy alta en el cálculo de tiempos de recorrido y consumo, ya que las marchas dentro del conjunto a diseñar para cada interestación, se diferencian en unos pocos segundos. Además, el grado de confort de una marcha requiere conocer su perfil con mucho detalle puesto que depende fuertemente de la pendiente de la vía en el punto de aplicación y corte de cada tracción, y de la duración del último ciclo de tracción antes del frenado final. En la mayoría de los metropolitanos en servicio señalizados mediante *Fixed Block* (FBS) el número de valores de los parámetros que admite el equipo ATO a través de baliza está muy limitado por ancho de banda, acotando el número de conducciones o marchas posibles. Con la llegada de nuevos sistemas de señalización y comunicación continua (CBTC) ya en funcionamiento en las Líneas 1, 6 [Bombardier, 2011] y 7b [Signals, 2011] de Metro de Madrid, Línea 9 de Metro de Barcelona [Siemens, 2009] que además opera sin conductor (GoA 4), y otras explotaciones en el extranjero, existe un número mucho más elevado de conducciones posibles entre cada dos estaciones [Gill and Goodman, 1992]. Por un lado existen más alternativas de marchas económicas, por otro, es aún más difícil averiguar cuáles son además confortables. Todo ello hace necesario desarrollar simuladores de conducción suficientemente precisos que incorporen la funcionalidad específica de cada equipo ATO, y que eviten largos y costosos procesos de prueba y error en circulación real con viajeros para validar, especialmente, el confort de las conducciones.

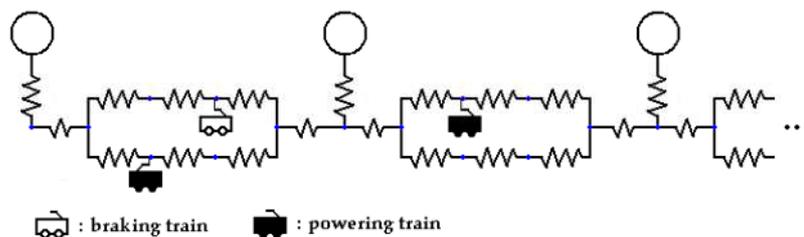


Figura 1.4: Transferencia de energía entre un tren que frena y otro que arranca en el mismo sector eléctrico. Fuente: [Peña-Alcaraz et al., 2012].

Por otra parte, recientemente las explotaciones metropolitanas comienzan a ser conscientes del importante ahorro energético que pueden conseguir mediante el aprovechamiento de la energía regenerada en el frenado de los trenes. Cuando el tren utiliza el freno eléctrico para reducir su velocidad, los motores pasan a funcionar en modo generador produciéndose energía. Por lo general, esta energía no se aprovecha completamente si no existe un tren cercano en el mismo sector eléctrico traccionando

que pueda utilizarla (Figura 1.4). En tal caso, el control de sobretensión embarcado desvía la corriente a bancos de resistencias donde se quema, convirtiéndose en calor. Sin embargo, hoy en día existen distintas posibilidades para reutilizar dicha energía [Miyatake and Ko, 2007]: si el sistema es de corriente alterna (AC) podrá inyectarse de nuevo en la red, si por el contrario es de corriente continua (DC), como en los metropolitanos, serán necesarios unos inversores en las subestaciones que permitan el paso de la corriente inyectada en la catenaria aguas arriba. También se puede optar por dotar a los trenes de acumuladores de energía que almacenen la que el propio tren genera en el frenado y lo alimenten de nuevo en el siguiente arranque. De manera similar, se pueden instalar estos acumuladores cerca de las subestaciones para poder reutilizar la energía de varios trenes. En consecuencia, el diseño óptimo de la conducción y las estimaciones de reducción de consumo asociadas a un rediseño de marchas, se pueden ver fuertemente condicionados por el grado de aprovechamiento de la energía regenerada. Por lo tanto, los modelos de conducción han de tener en cuenta el balance energético global de la línea y no de cada tren aislado, ajustando sus estrategias a cada escenario de operación e infraestructura de red. Por su parte, los estudios de inversión en equipos para mejorar el uso de la energía regenerada (acumuladores e inversores de corriente fundamentalmente) deben realizarse considerando en paralelo estrategias de conducción eficientes, para no adjudicarse ahorros que en parte ya se pueden obtener aplicando dichas estrategias y sin coste añadido.

Todos estos problemas están siendo investigados en la actualidad por separado de forma más o menos teórica, como le corresponde a un sector en auge como es el ferrocarril. Se trata por tanto de un tema de actualidad, no sólo a nivel nacional con proyectos y estudios destinados fundamentalmente a disminuir el consumo, sino también europeo e internacional.

1.2 Aportaciones de la tesis

La novedad de esta tesis reside en, por un lado, integrar todos los aspectos relacionados con el diseño de la conducción eficiente de trenes metropolitanos: tiempos de viaje, confort, consumo y energía regenerada, y por otro modelar de forma realista y detallada los sistemas y procesos de operación reales, para permitir la validación e implantación de nuevas estrategias de conducción ATO en líneas

metropolitanas en servicio comercial. Las pruebas de campo reflejan y justifican la validez de las aportaciones.

Es original el modelado que se propone del tráfico y de la red de tracción (incluyendo los posibles elementos de almacenamiento o inversión a la red de alterna) para permitir el diseño óptimo de cada marcha de conducción considerando el ahorro real en subestación debido a la energía regenerada.

Los modelos, procedimientos y algoritmos propuestos permiten el desarrollo de herramientas de evaluación de consumos y diseño de conducción para abordar sistemas reales y equipos de conducción automática en funcionamiento. Estas herramientas pueden ser de gran ayuda para las explotaciones metropolitanas en la optimización energética de su operación diaria, con un coste de inversión por rediseño de conducciones muy bajo.

1.3 Objetivos de la tesis

1.3.1 Objetivo central de la tesis

El objetivo principal de esta tesis doctoral es el desarrollo de modelos de diseño de la conducción eficiente de trenes metropolitanos equipados con ATO para reducir el consumo energético, manteniendo y mejorando los actuales requisitos de diseño de confort y operativos.

1.3.2 Objetivos específicos

De forma más concreta, los objetivos que se quieren cubrir en el contexto de la tesis planteada, y cuya consecución constituirán sus principales aportaciones, son:

- 1) El desarrollo de modelos que reproduzcan el movimiento del tren, la conducción automática y las características de la vía.

Sin la correcta caracterización y modelado de los sistemas en estudio no es posible analizar, de manera realista, las posibilidades de ahorro o la interdependencia de los distintos modelos. Especial relevancia tiene el modelado del sistema de conducción automática embarcado en los trenes (ATO), y que constituye una de las

grandes diferencias con los modelos y estudios propuestos hasta la fecha en la literatura.

- 2) El desarrollo de una herramienta de simulación flexible y suficientemente precisa como para obtener resultados que se puedan implementar en explotaciones reales, junto con un procedimiento de validación a partir de medidas reales.

Los modelos se han implementado en una herramienta de simulación. El éxito del procedimiento de diseño depende en gran medida de la precisión del simulador que se toma como base de decisión, por lo que se ha realizado un ajuste de cada subsistema simulado. Para ello se divide la herramienta en módulos independientes que representan el comportamiento de los subsistemas reales. Los distintos módulos del simulador se comunican entre sí emulando las señales reales que se transmiten los subsistemas, y que permiten validar la entrada-salida de cada módulo con las entradas y salidas reales que se han medido en registros embarcados en los trenes. De esta manera es posible identificar y aislar errores, así como ajustar el nivel de detalle del modelado de cada subsistema hasta obtener la precisión suficiente en cada uno. Una vez ajustado el modelo de cada subsistema, se ha validado el simulador global de manera que las posibles fuentes de error puedan ser aisladas en el módulo correspondiente.

El diseño modular del simulador posibilita además el intercambio de cada uno de los módulos de forma independiente. Así pues, ante un cambio en el sistema de ATO, o del tipo de tren, no se haría necesario redefinir la herramienta completa sino que bastaría con adecuar el módulo correspondiente.

- 3) El diseño de las conducciones óptimas.

La estrategia de diseño de marchas de conducción con criterios de eficiencia energética es un procedimiento basado en la simulación detallada de las marchas, análisis de las estrategias y comparación con el diseño actual de marchas. Esto ha permitido valorar el margen de ahorro energético esperable de la aplicación del nuevo procedimiento de diseño para justificar su implementación y predecir los ahorros potenciales.

En el diseño de las marchas cobran especial importancia, además de los criterios de eficiencia energética, criterios de confort para asegurar que los diseños propuestos

sean implementables. El adecuado modelado de estos criterios de confort, junto con la precisión del simulador, deben minimizar el número de ensayos en circulación real y el rediseño de nuevas conducciones por tratarse de marchas no confortables.

- 4) El desarrollo de algoritmos de optimización que permitan la generación automática de marchas de conducción en líneas metropolitanas conocidas las características de los trenes, la infraestructura eléctrica y la densidad del tráfico.

Una vez definido y validado el procedimiento óptimo de diseño, se ha desarrollado un algoritmo de optimización que permite la búsqueda automática de las mejores marchas. Este modelo de optimización es necesario cuando el número de conducciones alternativas de los trenes aumenta drásticamente en los nuevos sistemas de control de tren basados en comunicación continua (CBTC), al disponer de una gran capacidad de transmisión de datos al tren en el envío de las consignas de control.

- 5) El modelado de elementos de acumulación de energía embarcada en los trenes, y de devolución a la red, para la evaluación del ahorro esperable gracias al aprovechamiento del freno regenerativo en función de la conducción.

Se ha parametrizado el aprovechamiento de la energía regenerada en función de las características de la explotación metropolitana a estudiar (red de tracción, elementos de almacenamiento embarcados, frecuencia de trenes, etc.). De esta manera se puede incorporar el efecto de la energía regenerada de manera sencilla al proceso de diseño de la conducción.

Se han simulado las distintas combinaciones posibles de marchas, con y sin frenado regenerativo, así como los diferentes aprovechamientos y rendimientos en base al caso de estudio. Así, se pueden realizar análisis de sensibilidad de ahorro en el consumo global en función de los distintos elementos implicados en la conducción, en la infraestructura y en la operación.

1.4 Estructura de la tesis y divulgación

La tesis consta de 3 capítulos de contenido que pretenden solucionar los problemas que se han planteado.

En el Capítulo 2 se detalla el funcionamiento de un equipo de ATO real y su modelado, así como el del movimiento del tren y el del consumo en catenaria. Una vez validados los modelos se realiza el diseño de las marchas ATO de una línea real de metro y se evalúan los ahorros obtenidos tras su puesta en servicio. Los resultados están ya publicados en la revista *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* ([Domínguez et al., 2011]).

El Capítulo 3 incorpora en los cálculos la evaluación de la energía regenerada mediante un modelo de red que tiene en cuenta todos los trenes de la línea. Se definen varios escenarios para poder realizar la comparación de distintas tecnologías para el aprovechamiento de esta energía y se evalúan los resultados. Dichos resultado, al igual que en el caso anterior, están ya publicados en la revista *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* ([Domínguez et al., 2012]).

A continuación, en el Capítulo 4, se da un paso más considerando una mejor comunicación entre el centro de control y el tren dando lugar a un mayor número de marchas posibles entre interestaciones. Este escenario es posible en sistemas CBTC. Se propone una búsqueda automática de las marchas óptimas mediante un algoritmo de computación evolutiva. Se analizan los resultados y se propone una búsqueda por patrones de conducción. La publicación de estos resultados se encuentra actualmente en revisión en la revista *Engineering Applications of Artificial Intelligence*.

Por último, se resumen las principales conclusiones y aportaciones de la tesis en el Capítulo 5. Se incluye además en este documento un resumen con conclusiones en inglés.

1.5 Bibliografía

- AKERLOF, K., DE BONO, R., BERRY, P., LEISEROWITZ, A., ROSER-RENOUF, C., CLARKE, K. L., ROGAEVA, A., NISBET, M. C., WEATHERS, M. R. & MAIBACH, E. W. 2010. Public Perceptions of Climate Change as a Human Health Risk: Surveys of the United States, Canada and Malta. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 7, 2559-2606.
- BOMBARDIER 2011. CITYFLO 650 - Metro Madrid Solving the capacity challenge. In: TRANSPORTATION, B. (ed.).
- DOMÍNGUEZ, M., FERNANDEZ-CARDADOR, A., CUCALA, A. P. & PECHARROMAN, R. R. 2012. Energy Savings in Metropolitan Railway Substations Through Regenerative Energy Recovery and Optimal Design of ATO Speed Profiles. *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, 9, 496-504.
- DOMÍNGUEZ, M., FERNÁNDEZ, A., CUCALA, A. P. & LUKASZEWICZ, P. 2011. Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225, 463-474.
- FUNDACIÓN DE LA ENERGÍA DE LA COMUNIDAD DE MADRID. 2009. *Situación Energética. Sectorización del Consumo*. [Online]. Available: <http://www.fenercom.com/pages/informacion/situacion-energetica-de-la-comunidad-de-madrid-sectorizacion-del-consumo.html>.
- GILL, D. C. & GOODMAN, C. J. 1992. Computer-Based Optimization Techniques For Mass-Transit Railway Signaling Design. *IEE Proceedings-B Electric Power Applications*, 139, 261-275.
- GONZÁLEZ, F. J. 2005. Introducción a la Señalización Ferroviaria.
- IEEE 2004. IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements. *IEEE Std 1474.1-2004 (Revision of IEEE Std 1474.1-1999)*.
- KOLSRUD, G. S., JENNEY, L. L., DIGILIO, V. R., HIRSCH, T. E., JOHNSON, B. & MILES, T. 1976. Automatic Train Control in Rail Rapid Transit. USA: Office of Technology Assessment.
- LIU, F. & WU, J. S. 2010. Interrelationship between Human Activities and Climate Change. *Proceedings Of The 10th Conference On Man-Machine-Environment System Engineering*. Irvin: Sci Res Publ, Inc-Srp.
- METRO DE MADRID. 2008. Informe de Gestión.
- METRO DE MADRID. 2009. *Plan de ampliación de la red de Metro de Madrid 2007-2011* [Online]. Available: http://www.metromadrid.es/es/conocenos/proyectos_en_marcha/ampliaciones_y_remodelaciones/ampliaciones.
- MIYATAKE, M. & KO, H. 2007. Numerical optimization of speed profiles of inverter trains considering DC feeding circuit. *2007 Power Conversion Conference - Nagoya, Vols 1-3*. New York: IEEE.
- PAGE, C. R. 2009. Advances in Communications Based Train Control for Metro Railways. *Urban Rail 2009 - CBTC for Metro Railways*.
- PEÑA-ALCARAZ, M., FERNÁNDEZ, A., CUCALA, A. P., RAMOS, A. & PECHARROMÁN, R. R. 2012. 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, 397-408.

PORÉ, J. 2010. ATO for suburban and main lines. ITC of IRSE.

SIEMENS 2009. Trainguard MT CBTC - Driverless Metro System. *In: SAS, S. T. S.* (ed.).

SIGNALS, I. D. 2011. SIRIUS Dimetronic's communication based train control (CBTC). *In: SIGNALS, I. D.* (ed.).

2 Diseño eficiente de marchas

ATO

Notación

a	Aceleración del tren
A	Parámetro de la clotoide
a_o	Consigna de tracción de ATO
a_{baliza}	Deceleración recibida de la baliza
$A B C$	Coefficientes de la resistencia al avance
a_g	Aceleración debida a la pendiente del terreno
a_{lim}	Limitación de freno de servicio
a_{ref}	Deceleración de la curva de referencia
C_v	Carga de viajeros
E	Energía consumida
F_g	Fuerza debida a la inclinación del terreno
F_m	Fuerza del motor
$F_{max}(V)$	Fuerza máxima posible a la velocidad V
F_{ra}	Fuerza de resistencia al avance del tren en recta
g	Aceleración de la gravedad
I	Corriente consumida o generada a la velocidad V
I_m	Coefficiente de masas rotatorias
$I_{max}(V)$	Corriente máxima a la velocidad V
j	Jerk
k	Constante del control proporcional
K_c	Factor para el cálculo de curvas
K_v	Parámetro de la curva de acuerdo
L	Longitud de la curva de acuerdo
M	Masa del tren
M_{eq}	Masa equivalente del tren considerada
$M_{eq,max}$	Masa equivalente máxima del tren

M_v	Masa en vacío del tren
p	Pendiente del terreno
p_c	Pendiente ficticia equivalente que modela el efecto de la curva horizontal
p_{cm}	Pendiente ficticia debida a las curvas que afecta al centro de gravedad del tren
p_m	Pendiente del terreno que afecta al centro de gravedad del tren
p_t	Pendiente total en el centro de gravedad del tren
$R_1 R_2$	Radios de curva
R_t	Valor total del radio de curvatura que afecta al tren
s	Espacio
t	Tiempo
U	Tensión nominal
V	Velocidad del tren
V_{obj}	Velocidad objetivo
V_{ref}	Velocidad de la curva de referencia de freno
x	Distancia hasta el comienzo de la parábola de acuerdo
x_A	Posición del parámetro A de la clotoide
x_t	Posición del punto del tren sobre el que se calcula el radio de curvatura
y	Radio de la parábola de acuerdo
$\%T$	Porcentaje de esfuerzo respecto a la fuerza máxima $F_m / F_{max}(V)$
α	Ángulo de inclinación del terreno
η	Rendimiento de los motores
θ	Valor absoluto de la diferencia entre dos pendientes consecutivas
Δs	Incremento de espacio recorrido en Δt
Δt	Paso de tiempo utilizado

2.1 Introducción

Como ya se mencionó en la introducción de la tesis, la conducción de trenes en ferrocarriles metropolitanos modernos se realiza de forma automática mediante sistemas ATO embarcados en los mismos. En Metro de Barcelona y Metro de Madrid, por ejemplo, se utilizan cuatro marchas de regulación alternativas por cada interestación, mientras que en Metro de Bilbao se utilizan tres. El Sistema de Regulación de Tráfico selecciona en tiempo real de entre las marchas posibles, la que debe seguir el tren en su recorrido hasta la siguiente parada, y se la envía al ATO del tren. Esta marcha será rápida cuando el tren se retrase, o lenta cuando por el contrario sea necesario retenerlo. Desde el punto de vista del viajero, es preferible un recorrido de la interestación más lento que un mayor tiempo de espera con tren parado en el andén, contribuyendo además a un menor gasto de energía.

El diseño de las marchas de regulación alternativas se ha basado hasta ahora en criterios operacionales y de confort. Cada marcha a diseñar requiere un tiempo de recorrido adicional sobre la marcha de tiempo mínimo (marcha de recuperación de retrasos conocida como *marcha tendida*). Se pretenden aprovechar estos tiempos adicionales en realizar conducciones económicas, aplicando derivas (circulación sin tracción), o reducciones de velocidad en general, en tramos concretos del recorrido. El objetivo es por tanto incorporar criterios de eficiencia energética en el diseño de las marchas, obteniendo conducciones de menor consumo y manteniendo el resto de requisitos.

El problema de la conducción económica viene siendo abordado desde hace años habiéndose publicado numerosos estudios y resultados. Ninguno escapa a la dificultad que presenta el diseño óptimo de la conducción de un tren teniendo en cuenta todos aquellos factores que le afectan como son el perfil del terreno [Howlett and Cheng, 1997], los tiempos objetivo establecidos por el operador del sistema [Chang and Sim, 1997], requisitos de confort del viajero [Xun et al., 2008], la tensión de alimentación [Goodman, 2004], las características de la red que los alimenta, si se considera regeneración a red en el frenado [Bocharnikov et al., 2007], así como las particularidades funcionales y operativas de los equipos embarcados en el tren como el ATO [Yandan et al., 2002] y posibles acumuladores de energía [Miyatake and Matsuda, 2008]. No solo el número de estos factores aumenta la dificultad del problema, además, algunas variables como el perfil del terreno o los límites de velocidad dependen de la posición del tren, mientras que la fuerza disponible o la fuerza resistente varían con la velocidad [Wong and Ho, 2004]. Esto hace que dicho

problema haya sido abordado desde diferentes puntos de vista y se hayan utilizando distintas técnicas de resolución: modelos matemáticos o basados en simulación, focalización en la dinámica o en el equipo de ATO, simplificación de las restricciones, consideración de un control continuo o discretización de las variables que representan los parámetros de control, etc.

Los modelos matemáticos desarrollados en la literatura han utilizado principalmente técnicas de control óptimo. Por ejemplo, en [Ichikawa, 1968, Asnis et al., 1985, Khmel'nitsky, 2000, Golovitcher, 2001] [Pokorny, 2008] [Liu and Golovitcher, 2003] se utiliza el principio del máximo de Pontryagin. En [Khmel'nitsky, 2000] el objetivo es la construcción de un algoritmo numérico que dé lugar al consumo mínimo del tren. Se optimiza la trayectoria que se compondrá de una sucesión de modos de conducción. En [Asnis et al., 1985] se realiza un trabajo más sistemático de clasificación de las trayectorias óptimas en función de la velocidad inicial y la final, donde la variable de control es la aceleración aplicada y el control es de tipo continuo.

Debido a su complejidad estos estudios incluyen simplificaciones en los modelos del movimiento y control del tren. Esto hace que no sea útil su aplicación en el diseño de las marchas óptimas de ATO en sistemas metropolitanos debido a la precisión necesaria en interestaciones cortas, con pocos segundos de diferencia entre las marchas a diseñar, y a las características operativas del equipo de ATO concreto. Estos equipos suelen tener un número finito y determinado de parámetros de configuración, por lo que no es útil emplear en su optimización técnicas de control continuo, ya que se obtienen soluciones que el ATO no puede ejecutar. Evitando esto, y continuando con el enfoque matemático, Howlett [Howlett, 2000] considera el problema de determinar la estrategia óptima de conducción partiendo de una ecuación general del movimiento que pueda ser utilizada tanto en control discreto como en continuo. Se trata de un planteamiento totalmente teórico que trata de buscar los puntos de cambio de modo de conducción a lo largo del recorrido. Ya en [P. Pudney and Howlett, 1994] los autores habían sugerido métodos numéricos para la resolución del problema cuando sólo se pueden dar órdenes de tracción y frenado discretas. En dicho trabajo se tiene en cuenta un perfil de velocidades máximas pero de nuevo se simplifica no teniendo en cuenta el perfil del terreno. En [Howlett and Cheng, 1997] el planteamiento es el contrario, se considera un perfil de pendientes variables de forma continua (basado en la solución para pendientes constantes a tramos), pero no variaciones de velocidades máximas.

Viendo las dificultades de abordar el problema de control óptimo mediante técnicas numéricas, en [Franke et al., 2000] se desarrolla un algoritmo de programación dinámica discreta para obtener una solución del problema no lineal de control óptimo. Los resultados mostrados se comparan con medidas reales y con el resultado del problema simplificado, que suele dar como solución estrategias de derivas. El ahorro esperado está entre el 10% y el 30%. El modelo de tren que utiliza se acerca ya más a la realidad, sin tanta simplificación. Sin embargo su aplicación es para líneas de cercanías o largo recorrido con conducción manual. También se ha utilizado programación dinámica en [Ko et al., 2004] y en [Vašak et al., 2009] en ejemplos con simplificaciones y sin ATO .

Aspectos como el perfil del terreno, los límites de velocidad, la resistencia al avance del tren, etc. dificultan la resolución analítica del problema, y hacen en conclusión que los diseños basados en simulación sean una alternativa adecuada al no requerir simplificaciones y permitir un cálculo preciso de los tiempos de recorrido, el consumo energético y el perfil de velocidad. Como se muestra por ejemplo en el modelo de conducción manual de Lukaszewicz para trenes de carga [Lukaszewicz, 2001]. Son varios los estudios existentes que combinan simulación con alguna técnica de optimización.

En [Chang et al., 1999] se desarrolla un modelo de optimización multiobjetivo para mejorar el diseño del ATO modelado (no implementado), con lógica borrosa, de manera que se optimizan tiempo, consumo y confort. En un primer estudio se optimiza cada uno de ellos por separado, para posteriormente buscar un compromiso entre los tres. Las soluciones se simulan con la herramienta diseñada en [Chang et al., 1998]. En [Chang and Xu, 2000] se obtiene un algoritmo también con evolución diferencial que optimiza el funcionamiento del mismo ATO. El resultado en este caso es el vector de parámetros que da lugar a la marcha óptima, esto es, el vector de comandos para el ATO. De nuevo se utiliza simulación y también en la función objetivo intervienen confort, tiempo y consumo, cada uno de ellos con un determinado peso en función de la prioridad que se les quiera dar, condicionando así la solución óptima.

La conducción mediante derivas (sin tracción) ha sido considerada tradicionalmente como la mejor manera para conseguir ahorros, puesto que los motores están menos tiempo traccionando y por lo tanto consumiendo energía. Para aprovechar las ventajas de esta estrategia, sin superar el tiempo establecido de recorrido, es necesario calcular aquellas secciones donde, debido a la pendiente de la vía y a los límites de velocidad, se aprovecharían más las ventajas de cortar tracción.

La mayoría de los estudios utilizan algoritmos genéticos (AG) para el cálculo de dichos puntos. En [Bocharnikov et al., 2007] aseguran que el estudio, probado con un ejemplo del Metro de Londres, serviría tanto para conducción manual como automática, sin embargo, no incluyen en los modelos ninguna característica ni restricción de un equipo ATO realista. La técnica utilizada consiste en la simulación de la dinámica del tren y AG para buscar la solución. Esta conducción se selecciona de entre las posibles de una nube de soluciones. En la función objetivo se tiene en cuenta tanto el tiempo como el consumo, pero se pondera cada variable con un peso elegido aleatoriamente, y posteriormente se realizan simulaciones dando diferentes valores a los pesos. De nuevo, los resultados obtenidos dependen totalmente de la decisión “arbitraria”, como los autores reconocen, de la ponderación de los pesos en la función objetivo. También se utilizan AG en [Fu et al., 2009] para buscar los puntos de cambio de operación entre dos estaciones que minimicen el consumo de energía. La particularidad de este estudio es que se enfoca en trenes en condiciones perturbadas, por lo que la marcha encontrada no tiene por qué ser la óptima en condiciones normales, y por tanto la óptima a programar en el sistema de regulación de tráfico para su ejecución diaria. Algo parecido ocurre en [Yang et al., 2012] donde se diseña un AG para buscar una estrategia de deriva teniendo en cuenta múltiples trenes y sus interacciones. Esto responde a una situación particular de la red y no, una vez más, al funcionamiento en condiciones normales. En [Acampora et al., 2006] [Landi et al., 2008] utilizan un dispositivo a bordo de los trenes para tomar medidas del comportamiento del tren. A partir de estas medidas crean una “caja negra” con el funcionamiento del tren, es decir, no llegan a realizar su modelado. En base a estos datos tratan de optimizar la marcha con AG hallando el tiempo que el tren debe circular en cada modo (tracción, deriva...). Desafortunadamente, encuentran diferencias en los resultados de la optimización con los obtenidos a partir de las medidas tomadas.

En [Chuang et al., 2008] y [Chuang et al., 2009] sin embargo se emplean redes neuronales (RN) para resolver una función objetivo que tiene en cuenta tanto el consumo como los costes asociados a una percepción de un mayor tiempo de recorrido por parte de los usuarios. Se utiliza un simulador para el cálculo del consumo y se obtienen los puntos de cambio de consigna para situar las derivas. Se concluye que, aunque la implementación de derivas supone que el coste debido a la percepción del tiempo de recorrido por parte de los viajeros aumenta, el ahorro de energía que se consigue con dichas derivas lo compensa.

Algunos autores consideran que el cálculo de los puntos de deriva es óptimo únicamente cuando se realiza en tiempo real, justo antes de que el tren salga de la estación. De no ser así, aseguran que la conducción únicamente será óptima respecto a la operación nominal para la que se diseñe [Wong and Ho, 2004]. Este es precisamente el objetivo de la tesis. En el caso de metros como el de Bilbao, Barcelona o Madrid, existe una separación entre el control global del tráfico y la conducción económica. Es decir, el diseño de la conducción se debe realizar para los tiempos de recorrido que precisa el control, y en tiempo real se selecciona la marcha con el tiempo más adecuado según el estado del tráfico de entre el conjunto de marchas preprogramado. Además en este estudio [Wong and Ho, 2004], las condiciones impuestas para la resolución del problema no son del todo realistas puesto que distingue un caso con pendientes positivas de otro con pendientes negativas únicamente. En la tesis que se presenta el objetivo no es sólo realizar un modelado detallado del movimiento del tren y su conducción para que las simulaciones sean precisas, sino también evitar simplificaciones significativas como las del perfil del terreno, de gran importancia a la hora de encontrar las derivas óptimas y confortables.

En [Açikbas and Söylemez, 2008] se hace una optimización, también en tiempo real, de puntos de deriva, pero considerando varios trenes en circulación por distintas líneas. En la resolución del problema se utilizan RN y GA. Ha sido necesario además, utilizar un simulador multitren que incorpora el modelado del freno regenerativo y el rendimiento a bajas tensiones. Sin embargo, al igual que en casos anteriores [Bocharnikov et al., 2007, Chang and Xu, 2000], la función objetivo incluye el tiempo de recorrido y el consumo de la marcha ponderado con unos determinados pesos que condicionan la solución obtenida. Dicho estudio se hizo para la conducción manual del Metro de Estambul. Como en la mayoría de los casos, el perfil del terreno empleado no es continuo y además incluye valores muy pequeños de los desniveles.

Un tratamiento diferente de la deriva se da en [Jong, 2003], donde se obtienen las soluciones analíticas de las ecuaciones que rigen la dinámica del tren y se analizan especialmente los casos de deriva. Obtienen soluciones y curvas para distintos valores de gradiente y velocidades de deriva analizando el comportamiento del tren en cada caso. Se trata de un modelo analítico para analizar la dependencia de los puntos de deriva respecto a los factores anteriores, con valor académico pero no de aplicación realista.

En estos estudios se lanzan directamente a la búsqueda de los puntos de deriva dejando de lado las conducciones con regulación de velocidad. Sin embargo, la

variación del rendimiento de los motores con la velocidad y con el porcentaje de fuerza aplicado juega un papel importante en el consumo de las marchas, haciendo que no sea tan obvia la ventaja económica de las derivas frente a las regulaciones en algunos casos. Además, en recorridos con fuertes rampas es frecuente que no se puedan realizar derivas por motivos de confort. Uno de los objetivos de la tesis es el correcto modelado del rendimiento del sistema de tracción del tren en función de todas las variables de las que depende. Esto es de gran importancia puesto que el rendimiento condicionará la idoneidad de unas estrategias de conducción frente a otras en cada recorrido concreto (derivas frente a regulación de velocidad).

Como ya se ha mencionado, las características de la mayoría de los equipos ATO en servicio permiten valores discretos para cada uno de los parámetros configurables, dando como resultado un número limitado de marchas posibles. En consecuencia es posible simular todas y cada una de las conducciones posibles. En [Alves and Pires, 2010] se hizo un pequeño análisis del espacio de soluciones resultante de dicha combinación de parámetros, llegando a la conclusión de que es más eficiente frenar más rápido y aprovechar el ahorro de tiempo bajando la velocidad comercial. De esta manera su simulación obtuvo resultados de un 6% de ahorro de energía en media. A pesar de trabajar con un ATO, no consideran funcionamientos complejos como curvas de *braking*, que afectan en gran medida al tiempo y consumo de las marchas, puesto que no contemplan limitaciones de velocidad. Tampoco incluyen pendientes ni rendimientos, y acaban introduciendo retrasos en la línea aunque dentro de los márgenes permitidos. A diferencia de estos, en la tesis se realiza la simulación precisa y exhaustiva de todas las marchas de ATO posibles. De esta manera se pueden seleccionar, mediante técnicas de decisión multiatributo, las conducciones óptimas tanto en energía como en confort, teniendo en cuenta todas las características reales del equipo de ATO, de la línea y del tren y sin degradar los tiempos de recorrido comerciales.

En [de Cuadra et al., 1996] ya se llevó a cabo una optimización de consignas ATO de trenes metropolitanos con criterios energéticos utilizando técnicas de búsqueda directa. Al igual que en el caso anterior, el modelado de ATO no era lo suficientemente detallado por lo que los resultados son principalmente académicos. Se concluye que existe un amplio margen de ahorro de energía no explotado suficientemente, eligiendo combinaciones adecuadas de consignas de conducción en función del perfil de la vía.

LITERATURA	Domínguez, M.
Control continuo [Ichikawa, 1968, Asnis et al., 1985, Khmelnitsky, 2000, Golovitcher, 2001, Liu and Golovitcher, 2003, Pokorny, 2008]	ATO discreto
Simplificaciones en modelos matemáticos [Asnis et al., 1985, Golovitcher, 2001, Ichikawa, 1968, Khmelnitsky, 2000, Vařak et al., 2009]	Exactitud en el modelado
Simulaciones sin ATO [Franke et al., 2000, Lukaszewicz, 2001, Ko et al., 2004] o poco detallado [de Cuadra et al., 1996, Alves and Pires, 2010, Fernández Cardador, 1997]	Especificación del equipo de ATO
Búsqueda de puntos de deriva [Wong and Ho, 2004, Chuang et al., 2008, Açıkbaz and Söylemez, 2008, Chang and Sim, 1997, Chuang et al., 2009, Fernández Cardador, 1997]	Búsqueda de la conducción óptima, sea con derivas o con regulación
Recuperación de retrasos en tiempo real [Wong and Ho, 2004, Açıkbaz and Söylemez, 2008, Chang and Sim, 1997]	Separación de operación y conducción: diseño para operación nominal
Condiciones perturbadas [Fu et al., 2009, Yang et al., 2012]	
Ponderación de tiempo y consumo en la función objetivo [Chang et al., 1999, Chang and Xu, 2000, Bocharnikov et al., 2007, Chang and Sim, 1997]	Consumo óptimo para tiempos establecidos
Modelos teóricos-académicos [Howlett, 2000, P. Pudney and Howlett, 1994, Howlett and Cheng, 1997, Jong, 2003]	Modelos de equipos reales. Implementación
Perfiles llanos, con desniveles pequeños o pendientes constantes [P. Pudney and Howlett, 1994, Howlett and Cheng, 1997, Wong and Ho, 2004, Xun et al., 2008, Alves and Pires, 2010, Fernández Cardador, 1997]	Perfiles reales con grandes desniveles
Modelado sin optimización [Jong and Chang, 2005a, Yandan et al., 2002, Bih-Yuan et al., 2000, Jong and Chang, 2005b]	Optimización y modelado
Optimización sin modelado [Acampora et al., 2006, Landi et al., 2008]	
Evaluación del confort mediante el jerk [Chang et al., 1999, Chang and Xu, 2000, Chang and Sim, 1997]	Evaluación del confort de la marcha completa

Tabla 2.1: Aportaciones de la tesis frente al estado del arte

En conclusión, aunque existen numerosos estudios en la literatura acerca del movimiento, conducción y consumo del tren, y muchos de ellos tratan de buscar la conducción más económica, en la práctica ninguno de ellos se podría aplicar en el diseño de la conducción automática en líneas metropolitanas con interestaciones cortas gestionados mediante un control de tráfico centralizado (el cual decide los tiempos de recorrido en tiempo real).

El trabajo de este capítulo parte del realizado en [Fernández Cardador, 1997] que ya abordó en parte la simulación detallada del movimiento del tren. No se tuvieron en cuenta sin embargo, restricciones de confort, pendientes continuas ni funcionamientos complejos del equipo ATO y se consideró únicamente la conducción mediante consignas de deriva – remotor así como un modelo de rendimiento no contrastado con datos reales.

En la Tabla 2.1 se resumen las aportaciones de esta tesis frente a los aspectos que otros estudios no cubren y se consideran necesarios para alcanzar los objetivos.

2.2 Modelos

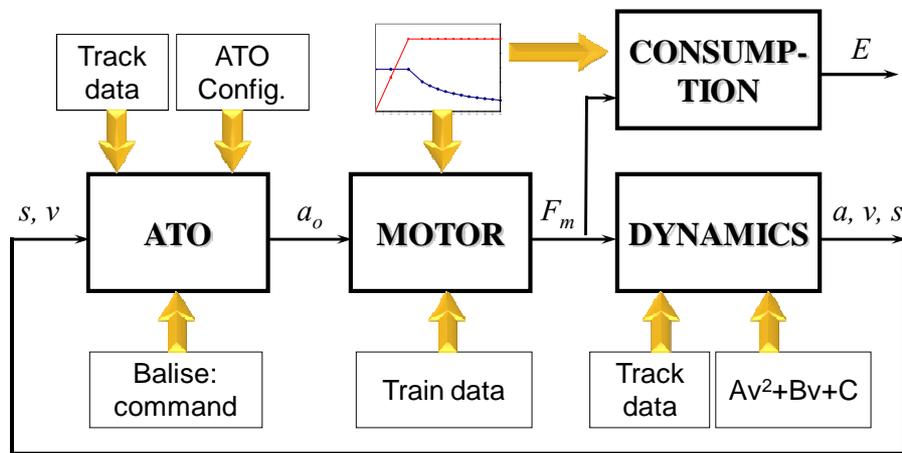


Figura 2.1: Diagrama de bloques del simulador

Las variables de decisión a la hora de diseñar una marcha eficiente son el tiempo de recorrido y el consumo, respetando siempre el confort de los viajeros. El cálculo de estas variables, por lo tanto, debe ser lo más preciso posible con el objetivo de tomar una decisión adecuada. La exactitud de los resultados depende de lo buena que sea la simulación de la marcha completa entre dos estaciones. Para conseguir esta precisión, se ha modelado el comportamiento del tren mediante un diseño modular. Cada módulo representa los diferentes subsistemas de un tren real (Figura 2.1). De esta manera es posible validar cada módulo por separado, identificando y aislando errores, de forma que sea posible obtener la precisión suficiente en cada uno de ellos. Esto facilita además la posibilidad de utilizar distintos sistemas de ATO o material móvil, simplemente ajustando el módulo en concreto tal y como se ha hecho en los diseños de Metro de Bilbao [Cucala et al., 2012], Barcelona y Madrid [Domínguez et al., 2011].

El equipo del primero pertenece a Bombardier (EBICRUISE 800), mientras que en Barcelona y Madrid se utiliza un ATO de Dimetronic (TBS 500 [Invensys Dimetronic Signals]). A continuación se detallará cada uno de los módulos por separado. Mientras no se especifique lo contrario, las descripciones se ajustarán al equipo utilizado en los Metros de Barcelona y Madrid.

2.2.1 Modelo de ATO

El modelo de ATO debe reproducir la lógica de conducción del tren. A partir de la velocidad y posición del tren, el ATO calcula en cada momento la consigna de tracción a enviar al motor. Esta consigna, como se verá más adelante, es un porcentaje del esfuerzo máximo a aplicar por los motores, tal que la velocidad del tren que se consiga permita cumplir con los tiempos de recorrido necesarios sin superar las velocidades máximas de vía. En consecuencia la consigna de ATO tomará siempre valores entre -1 (100% de freno) y 1 (100% de tracción), emulando a las posiciones extremas del manipulador manual de tracción/freno (la palanca del regulador de mando). Es decir, el ATO sustituye a la conducción manual pero siguiendo la misma lógica. En conducción manual (sin ATO), el conductor avanzaría la palanca del regulador de mando (Figura 2.2) hasta final de escala para conseguir aceleración máxima, es decir, estaría solicitando un 100% de esfuerzo de tracción. Para reducir la demanda de tracción desplazaría la palanca, por ejemplo, hasta mitad de la escala positiva, solicitando así un 50% de tracción. De manera análoga, para ordenar freno máximo retrasaría la palanca hasta final de escala. Y al igual que en cualquier momento el conductor puede llevar el manipulador a su punto medio dejando al tren sin tracción ni freno, también el ATO puede enviar una consigna nula al motor indicando deriva.

El ATO recibe por medio de las balizas situadas en la vía (como en Metro de Barcelona o Madrid) o a través de los circuitos de vía de estacionamiento (como en Metro de Bilbao) los parámetros que configuran la marcha que debe ejecutar. En función de ésta y de los datos de vía, que pueden estar grabados en memoria del tren (Barcelona y Madrid), o recibirse en trayecto mediante telegramas a través de los circuitos de vía (por ejemplo en Bilbao), el ATO dará consignas al motor del tren para ejecutar marcha tendida, regulación de velocidad o ciclos de deriva-remotor. Los datos de vía que maneja el ATO son las velocidades máximas de circulación, las pendientes del terreno y los puntos de parada en estación. En caso de líneas CBTC existe

comunicación continua inalámbrica de gran ancho de banda con el tren, por la que se envían todos los datos.



Figura 2.2: Conductor de metro manipulando la palanca del regulador de mando. (Fuente: www.metromadrid.es)

La consigna de ATO (a_o en la Figura 2.1) se calcula según (2.1) como el incremento de velocidad necesario para alcanzar la velocidad objetivo corregido con el gradiente del terreno y se limita a sus valores máximos de tracción y freno (1 y -1 respectivamente). Éste cálculo responde al funcionamiento de un control proporcional donde la ganancia k se relaciona con la rapidez con la que se trata de alcanzar la velocidad objetivo.

$$a_o = k \cdot (V_{obj} - V) + a_g \quad (2.1)$$

Donde:

a_o es la consigna de ATO

k es la constante proporcional del control

V_{obj} es la velocidad objetivo

V es la velocidad del tren

a_g es una prealimentación que compensa el desnivel del terreno

El parámetro a_g es una prealimentación del controlador que trata de proporcionar aproximadamente la consigna de tracción necesaria para compensar el desnivel del terreno. De esta forma por ejemplo, circulando sin error de velocidad y en rampa, la consigna de tracción es la adecuada para mantener aproximadamente el valor de velocidad, permitiendo al control proporcional actuar alrededor del valor prealimentado. Para ajustar esta prealimentación en los equipos TBS 500 en Metro de Madrid y Barcelona se aproxima a 1 m/s^2 la aceleración del tren a fuerza máxima, por lo que la aceleración necesaria para compensar la pendiente es (2.2). Es decir, la prealimentación se aproxima por el valor de la deceleración de la gravedad que afecta al tren en rampa o pendiente (aceleración de la gravedad por el valor de la pendiente).

$$\frac{F_m}{F_{\max}} = \frac{M \cdot a_g}{M \cdot 1} = a_g \quad (2.2)$$

Donde:

F_m es la fuerza del motor

F_{\max} es la fuerza máxima

M es la masa del tren

El resultado de la ecuación (2.1) podría tomar valores cercanos a 0, por ejemplo en el caso de que el tren circule sin error de velocidad sobre un terreno con ligera pendiente. En ese caso, el ATO estaría constantemente oscilando entre valores diferenciales positivos y negativos de porcentajes de esfuerzo. Para evitar este comportamiento se introduce una histéresis. De esta manera, si el resultado es negativo, no tomará un valor positivo hasta que éste sea mayor que un cierto umbral, y viceversa. Asimismo, antes de cambiar de freno a tracción o de tracción a freno, el ATO debe ordenar deriva durante un tiempo mínimo que dependerá del equipo ATO considerado ($500\text{ms} \div 950\text{ms}$). Este tipo de funcionamiento, así como los ciclos de cálculo propios del sistema electrónico ATO, se han incluido en los modelos para obtener una mayor precisión en los cálculos de las variables de decisión.

El equipo de ATO de Metro de Bilbao utiliza un control proporcional integral derivativo (PID), y en este caso la consigna de tracción a_o es directamente el esfuerzo absoluto que se solicita a los motores (no el relativo a la fuerza máxima). Por ello la

configuración de este equipo ATO también tiene en cuenta la curva de esfuerzo máximo específica del tren.

2.2.1.1 Detección de freno

Gracias al mapa de vía que el ATO almacena en memoria, o recibe mediante telegramas, éste puede supervisar la proximidad del tren a un punto de reducción de velocidad máxima (Figura 2.3) y calcular la deceleración necesaria para alcanzar el nuevo límite de una manera segura y confortable.

El punto kilométrico en el que el ATO envía consigna de freno a los motores debido a una restricción de velocidad se evalúa en cada ciclo de cálculo en el que se ejecuta el algoritmo de control del ATO. Este algoritmo se compone de cuatro periodos de cálculo diferentes (dos en el caso de Metro de Bilbao) que dependen de la velocidad; dos de ellos simulan periodos de tracción seguidos de una hipotética deriva antes del freno. Tras la evaluación de este algoritmo, el resultado puede ser que el tren haya alcanzado el punto kilométrico en el que debe empezar a reducir velocidad para ajustarse a la siguiente restricción, o por el contrario, que no sea necesario que el tren modifique su comportamiento aún.

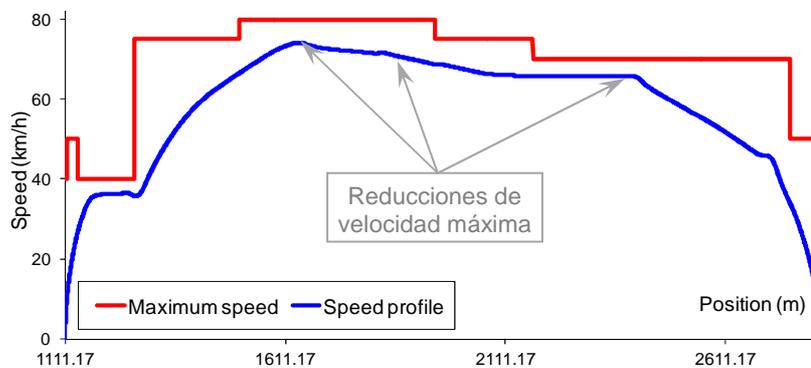


Figura 2.3: Ejemplo de marcha entre dos estaciones

En el momento en el que el tren alcanza el punto kilométrico de comienzo de freno, es posible calcular una curva de freno teórica hacia el punto de freno. Esta curva se lanza entre el punto de detección con la velocidad que lleva el tren, y el punto de reducción con la velocidad objetivo, como una recta con deceleración constante (a_{ref}). Una vez comenzado el frenado, el ATO utiliza esa curva de freno para actualizar su velocidad de referencia V_{ref} , forzando al tren a seguir dicha curva.

Además, se prealimenta adicionalmente con la deceleración de freno a_{ref} , de manera que, si no hay error de velocidad y circulando en llano, la consigna de tracción solicite aproximadamente dicha deceleración (2.3) (por el mismo razonamiento que se vio en el apartado anterior para la prealimentación de la pendiente).

De nuevo el control es proporcional, con la diferencia respecto al caso anterior de que la ganancia depende de la velocidad (es mayor a velocidades bajas) para asegurar que en todo momento el control del frenado se realiza sin errores excesivos de velocidad que pudieran provocar la actuación del ATP.

$$a_o = k(V) \cdot (V_{ref} - V) - a_{ref} + a_g \quad (2.3)$$

Donde

$k(V)$ es una constante de proporcionalidad que depende de la velocidad

V_{ref} es la velocidad de la curva de referencia de freno

a_{ref} es la deceleración de la curva de referencia

2.2.1.2 Frenado de detención

Al igual que en el caso anterior, el ATO trata de detectar en todo momento el punto de parada próximo para asegurar un frenado hasta detención total del tren, siempre con deceleraciones que no superen un valor límite, y con transiciones suaves desde el estado anterior hasta el freno máximo. Sin embargo, en este caso la detección del punto en el que el tren debe comenzar la reducción se hace con un algoritmo diferente para el que se necesita una curva de referencia de freno específica.

El ATO calcula una curva teórica de freno en el punto de parada con el valor de deceleración que recibió de baliza a la salida de la estación y la almacena en memoria (Figura 2.4). En este caso, el gradiente del terreno únicamente se tiene en cuenta si es negativo y si su valor sumado al de la deceleración de baliza, da como resultado un valor mayor a la limitación de freno de servicio (2.4). Es decir, se limita la deceleración de la curva de freno a la máxima deceleración del freno de servicio considerando la deceleración que introduce la pendiente en su caso (nótese que a_g en pendiente es negativo):

$$a_{ref} = \begin{cases} a_{lim} + a_g & \text{si } a_g < 0 \text{ y } a_{baliza} - a_g \geq a_{lim} \\ a_{baliza} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.4)$$

Donde:

a_{lim} es la limitación de freno de servicio

a_{baliza} es la deceleración recibida de la baliza

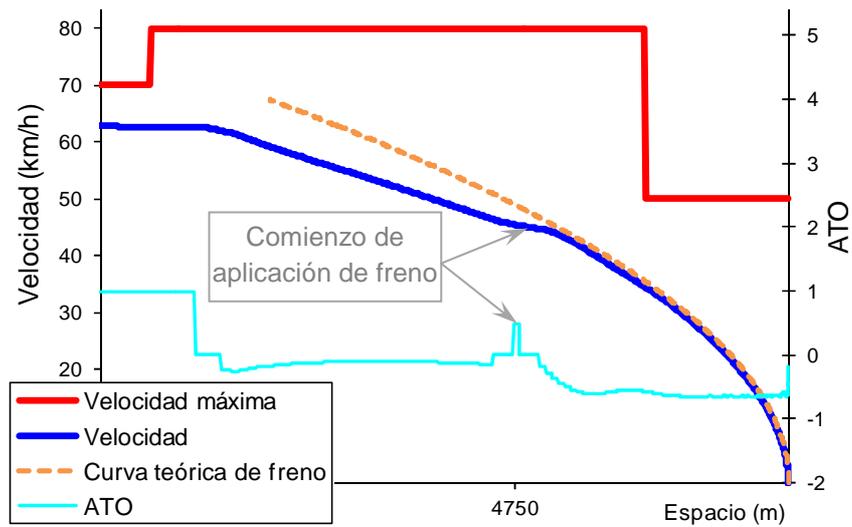


Figura 2.4: Ejemplo de curva teórica de freno y curva seguida finalmente por el ATO

Para decidir el instante en el que se debe comenzar el frenado de detención, en cada ciclo de cálculo del ATO se obtiene la distancia que resultaría si el tren avanzara durante un corto periodo de tiempo con la máxima aceleración disponible. En el espacio resultante y con la velocidad real del tren se comprueba si en este punto la consigna de tracción asociada al seguimiento de la curva de freno anterior sería de freno, (signo negativo en la ecuación (2.5)) y en tal caso comienza el proceso de frenado hasta la detención del tren.

$$k(V) \cdot (V_{ref} - V) - a_{ref} \quad (2.5)$$

Donde:

V_{ref} es la velocidad que tendría el tren si siguiera la curva de referencia

La consigna de ATO que se debe enviar a los motores durante el proceso de frenado hasta alcanzar la parada (2.6) se calcula regulando alrededor de la curva de freno de referencia como en el apartado anterior.

$$a_o = k(V) \cdot (V_{ref} - V) - a_{ref} + a_g \quad (2.6)$$

2.2.2 Modelo del motor

Una vez calculada la consigna de tracción en el módulo de ATO, se calcula el esfuerzo de tracción (F_m) a solicitar al sistema de control de los motores multiplicando dicha consigna por el esfuerzo máximo que puede proporcionar el tren ($F_{max}(V)$) para su velocidad, y a partir de él se calcula el consumo eléctrico asociado. En algunos equipos ATO, como en el de Metro de Bilbao, la consigna de tracción es directamente la solicitud de esfuerzo de tracción.

Por lo tanto, para el correcto modelado de este comportamiento es necesario conocer las características del equipo de tracción, las curvas de esfuerzo e intensidad en función de la velocidad, y otras características del tren como la longitud o la masa.

2.2.2.1 Masa

El esfuerzo que hace el tren para remolcar su masa no se debe únicamente a la resistencia de inercia por el movimiento de traslación, también al de rotación de las masas rodantes (ruedas y ejes). Esta resistencia se modela incrementando el valor de la masa en vacío del tren con un coeficiente conocido como *coeficiente de masas rotatorias* que suele tener un valor entre el 5% y el 12% de la tara del tren. A la masa resultante se le suma también la carga de viajeros transportados (2.7).

$$M_{eq} = M_v \cdot (1 + I_m) + C_v \quad (2.7)$$

Donde:

M_{eq} es la masa equivalente del tren considerada

M_v es la masa en vacío del tren

I_m es el coeficiente de masas rotatorias

C_v es la carga de viajeros

2.2.2.2 Curvas de tracción

En las curvas de tracción de los motores se distinguen dos zonas de comportamiento (Figura 2.5). En la primera, la fuerza del motor está limitada por la adherencia, y el esfuerzo máximo aplicable depende de la masa total del tren, mientras que la corriente depende además de la velocidad. Es decir, existe una familia de curvas con valores máximos dependientes de la carga (Figura 2.6). Los fabricantes suelen disponer, al menos, de las curvas para carga máxima y para tara, por lo que es posible interpolar entre ambas para cargas intermedias.

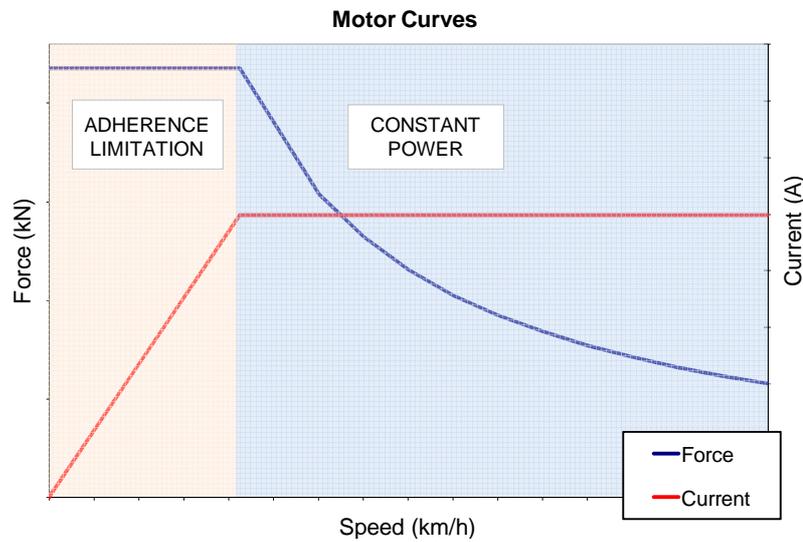


Figura 2.5: Ejemplo de curvas de esfuerzo y corriente máxima de los motores

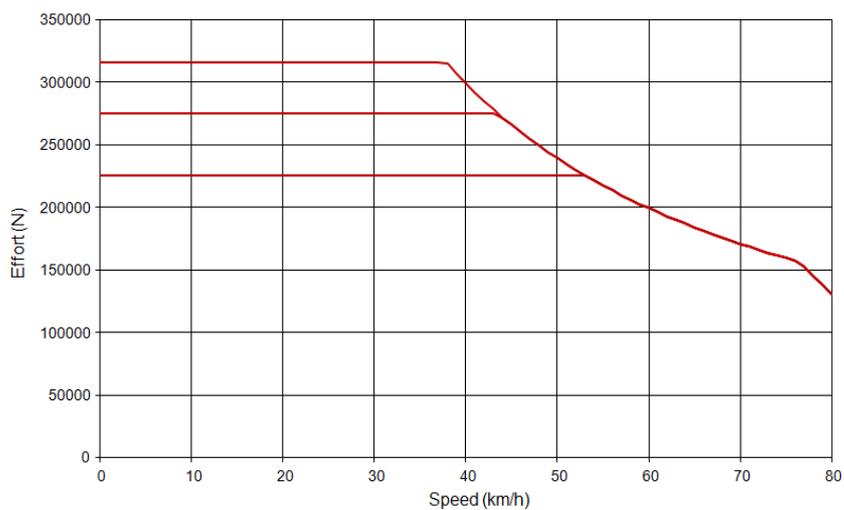


Figura 2.6: Familia de curvas de esfuerzo de tracción dependientes de la carga (Carga máxima, 50% de carga y tara). (Fuente: Alstom)

En la segunda zona de las curvas, sin embargo, la limitación es de potencia. La corriente máxima se mantiene aproximadamente constante, al igual que la potencia, y es la fuerza la que varía en función de la velocidad.

En el caso de que el ATO solicite esfuerzo máximo, los motores proporcionan la fuerza y la intensidad máximas en función de la velocidad del tren. Cuando el ATO solicita un esfuerzo reducido (un porcentaje de tracción respecto de la fuerza máxima $\%T = F_m/F_{max}$), los motores proporcionarán valores de corriente y fuerza por debajo de estas curvas máximas.

Esto significa que también existe una familia de curvas de fuerza e intensidad dependiente del $\%T$. Sin embargo se suele disponer solamente de las correspondientes a tracción máxima ($\%T=1$). Un ejemplo de estas curvas máximas son las de la Figura 2.5.

2.2.2.3 Cálculo del esfuerzo

La consigna que se envía desde la mayoría de los equipos ATO indica el porcentaje de fuerza a aplicar respecto a la máxima fuerza disponible para la velocidad del tren ($\%T$). Dicha curva de esfuerzo máximo en función de la velocidad se construye a partir de la carga del tren considerada en la simulación, interpolando entre las curvas de esfuerzo máximo a carga máxima y mínima en la zona de fuerza constante (Figura 2.6). Sobre ella se aplica $\%T$ a la fuerza máxima obtenida de la curva anterior para la velocidad del tren (2.8).

Por su parte, los equipos ATO que proporcionan como consigna el esfuerzo absoluto tienen información sobre las curvas de esfuerzo del motor.

$$F_m = \%T \cdot F_{max}(V) \quad (2.8)$$

Donde:

$F_{max}(V)$ fuerza máxima posible a la velocidad V .

Se ha incluido también en el modelado del motor el retardo que existe desde que éste recibe la orden de ATO, hasta que es posible su ejecución.

2.2.2.4 Jerk

El *jerk* es la derivada de la aceleración respecto al tiempo (2.9) y también es conocido como *sobreaceleración*. Un alto valor de jerk provoca sacudidas en el tren que pueden resultar muy incómodas para los viajeros.

$$j = \frac{da}{dt} = \frac{d^2v}{dt^2} = \frac{d^3s}{dt^3} \quad (2.9)$$

Donde:

j es el jerk

a es la aceleración

s es el espacio

t es el tiempo

Los trenes suelen contar con equipos de control que limitan los valores de jerk dentro del rango confortable. Este control se puede realizar en el equipo de ATO (Metro de Bilbao), o en los motores (Metro de Barcelona y Madrid). En el primer caso directamente se le envía a los motores una consigna que evita cambios bruscos de aceleración. En el segundo, se comprueba que la fuerza resultante de la consigna enviada por el ATO no supone un incremento violento respecto al último esfuerzo aplicado. Previene de sufrir “tirones” en el tren en transiciones tracción-freno o freno-tracción para asegurar el confort de los viajeros.

La limitación de jerk incluida en el modelado del motor responde a la ecuación (2.10), que limita la variación de fuerza en cada ciclo de simulación a la variación de aceleración máxima (jerk máximo j) por la masa y por tiempo del ciclo:

$$\frac{1}{M_{eq}} \frac{dF_m}{dt} > \frac{da}{dt} \Big|_{lim} \Rightarrow F_{m2} - F_{m1} = M_{eq} \cdot j \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.10)$$

2.2.3 Dinámica del tren

Tras el cálculo del esfuerzo que proporcionan los motores en un ciclo de simulación, llega el momento de calcular la aceleración resultante, y la velocidad y posición del tren al final del ciclo. Para ello es necesario incluir en los modelos la resistencia al movimiento del tren.

2.2.3.1 Resistencia aerodinámica

Como es habitual la resistencia a la rodadura y la resistencia aerodinámica se modelan según la ecuación (2.11) también conocida como *fórmula de Davis*.

$$F_{ra} = A + B \cdot V + C \cdot V^2 \quad (2.11)$$

Donde

F_{ra} es la fuerza de resistencia al avance del tren en recta

A es el coeficiente de la resistencia al avance debido a la resistencia mecánica

B es el coeficiente de resistencia al avance debida a la entrada de aire en el tren

C es el coeficiente aerodinámico

2.2.3.2 Resistencia debida a la inclinación del terreno

Existe otra fuerza debida a la inclinación del terreno que se resiste al avance del tren cuando está traccionando, en rampas, o por el contrario se suma a la fuerza motor en pendientes. Esta fuerza de resistencia se deduce de la ecuación (2.12) y la Figura 2.7.

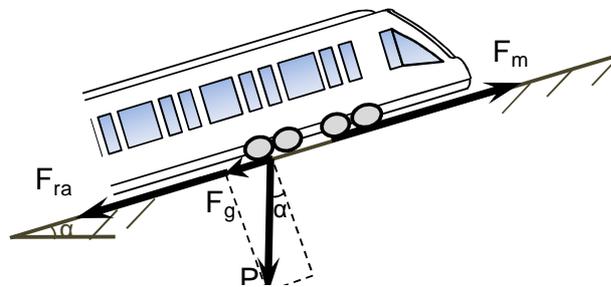


Figura 2.7: Diagrama de fuerzas en rampa

$$F_g = g \cdot \text{sen} \alpha \cong g \cdot \text{tg} \alpha \cong g \cdot \frac{p_t}{1000} = 9.81 \cdot \frac{p_t}{1000} \quad (2.12)$$

Donde:

F_g es la fuerza debida a la inclinación del terreno

g es la aceleración de la gravedad

α es el ángulo de inclinación del terreno

p_t es la pendiente total del terreno en mm/m

Por lo tanto es necesario disponer de todas las pendientes y rampas del terreno. Esto es fácil de conocer en zonas de la vía donde la pendiente es constante durante bastante longitud. Sin embargo, en las zonas de transición entre dos pendientes de diferente valor existen además *acuerdos verticales*.

Los acuerdos verticales son curvas parabólicas que sirven de enlace entre tramos con pendiente distinta a fin de proporcionar una transición suave al pasar de un tramo a otro. En general, la función utilizada para definir la curva de transición entre dos pendientes se puede aproximar por la curva parabólica modelada con la ecuación $x^2/(2 \cdot Kv)$ [Fomento, 2010]. El parámetro Kv se puede aproximar por L/θ , siendo L la longitud de la curva de transición, y θ el valor absoluto de la diferencia entre las dos pendientes en los extremos en radianes (i_1, i_2 , en la Figura 2.8).

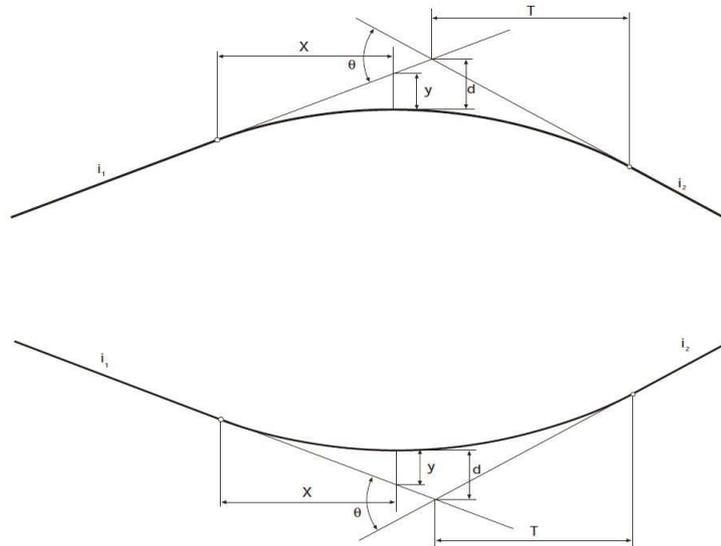


Figura 2.8: Transiciones entre pendientes. Fuente [Fomento, 2010]

La pendiente p en cada punto de la parábola de acuerdo se calcula según (2.13) teniendo en cuenta la expresión parabólica del acuerdo definida anteriormente.

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot Kv} \Rightarrow y' = p = \frac{x}{Kv} \quad (2.13)$$

Donde:

x es la diferencia de espacio entre el punto de cálculo considerado y el comienzo de la parábola de acuerdo

y es el radio de acuerdo de la parábola

p es la pendiente

K_v es el parámetro del acuerdo

Una vez conocida la pendiente en cada punto del terreno es necesario distinguir aquella que le afecta al tren. Sin embargo, el tren puede estar situado sobre distintas inclinaciones a lo largo de toda su longitud como muestra la Figura 2.9. Esto hace que el siguiente cálculo necesario sea el de la pendiente en cada diferencial de tren y posterior media referenciada en su centro de masas (CM). En el caso más complejo, el tren se encontrará sobre tres tramos diferentes (ver Figura 2.9). El primero y el tercero serán de pendiente constante p_1 y p_3 , de longitudes L_1 y L_3 respectivamente, y el intermedio de pendiente variable, de longitud L_2 , y que forma el tramo de acuerdo entre las dos pendientes adyacentes. La pendiente media p_m se calculará entonces mediante la expresión (2.14) siendo el término del sumatorio la contribución a la pendiente media del tramo de radio de acuerdo de longitud L_2 , que, como se observa, se aproximará mediante la suma de pequeños tramos de pendiente constante y longitud tan pequeña como se quiera.

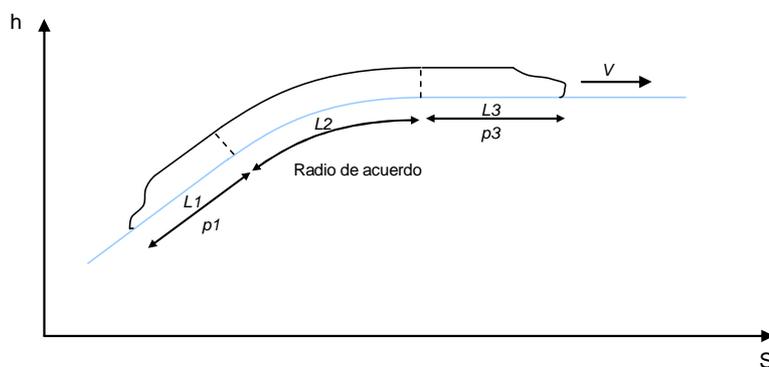


Figura 2.9: Consideración de la pendiente media. Fuente: [Sicre Vara de Rey, 2013]

$$p_m = \frac{L_1 \cdot p_1 + \sum_{i=0}^{L_2} L_i \cdot p_i + L_3 \cdot p_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (2.14)$$

Dónde

p_m es la pendiente media en el CM del tren

Hay que señalar que aunque se utilice un perfil continuo para calcular la dinámica del tren, en el módulo de ATO siempre se utilizarán las pendientes del mapa de vía que el equipo tiene almacenado en memoria o recibe mediante telegramas. Estas pendientes consideran transiciones bruscas sin curvas de acuerdo.

2.2.3.3 Resistencia debida a las curvas horizontales

Las transiciones entre dos curvas horizontales consecutivas de diferente radio se modelan mediante *clotoides*, siendo diferente el valor del radio de curvatura en cada punto de la clotoide. La ecuación (2.15) calcula el radio de curvatura que afecta al punto del tren considerado.

$$\begin{aligned}
 R_1 = r_1 > R_2 = r_2 & \quad \left\{ \begin{array}{l} x_t = x_A \rightarrow R_t = \infty \\ x_t \neq x_A \rightarrow R_t = \frac{A^2}{A^2/r_1 + (x_t - x_A)} \end{array} \right. \quad (2.15) \\
 R_1 = r_1 < R_2 = r_2 & \rightarrow R_t = \frac{A^2}{A^2/r_1 - (x_t - x_A)}
 \end{aligned}$$

Donde:

R_1 es el radio de la primera curva, de valor r_1

R_2 es el radio de la segunda curva, de valor r_2

x_t es la posición del punto del tren sobre el que se calcula el radio de curvatura

x_A es la posición del parámetro A de la clotoide

A es el parámetro de la clotoide

R_t es el valor total del radio de curvatura que afecta al tren

Una vez hallado el radio de curvatura, éste se transforma en una pendiente "ficticia" (2.16). Al igual que en caso anterior, se calculan todas las pendientes ficticias que afectan a la longitud del tren para posteriormente calcular la media en el CM. El resultado se añade a la pendiente real calculada anteriormente (2.14) siendo la suma de ambas la pendiente total que afecta al tren (2.17).

$$p_c = \frac{K_c}{R_t} \quad (2.16)$$

Donde:

p_c es la pendiente ficticia equivalente que modela el efecto de la curva horizontal

K_c es un factor dependiente de cada sistema ferroviario

R_t es el radio de la curva horizontal hallado en (2.15)

$$p_t = p_m + p_{cm} \quad (2.17)$$

Donde:

p_t es la pendiente total en el centro de gravedad del tren

p_m es la pendiente debida a la inclinación del terreno que afecta al CM del tren y que fue hallada en (2.14)

p_{cm} es la pendiente ficticia debida a las curvas que afecta al CM del tren

2.2.3.4 Nueva posición, velocidad y aceleración.

Finalmente, la aceleración del tren es el resultado de la ecuación (2.18), es decir, del balance de todas las fuerzas que afectan al tren (Figura 2.7). La velocidad y posición del tren se calculan ahora con las ecuaciones del movimiento lineal uniformemente acelerado suponiendo constante la aceleración en cada paso de tiempo suficientemente pequeño (2.19) y (2.20).

Como ya se ha mencionado, se están teniendo en cuenta en los cálculos tanto los ciclos de cálculo del equipo de ATO, como los tiempos de retardo entre equipos. En el caso de Metro de Barcelona y Madrid todos estos tiempos tienen como máximo común divisor 50ms. Por lo tanto este es el paso de tiempo utilizado, que proporciona además una gran precisión en los cálculos.

$$a = \frac{\sum (F_m - F_g - F_{ra})}{M_{eq}} \quad (2.18)$$

$$\Delta V = a \cdot \Delta t \quad (2.19)$$

$$\Delta s = V \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2 \quad (2.20)$$

Donde:

Δt es el paso de tiempo utilizado

Δs es el incremento de espacio recorrido en Δt

2.2.4 Modelo de consumo

La energía que consumen los motores en cada incremento de tiempo de simulación se calcula como la potencia eléctrica (tensión por intensidad consumida) multiplicada por el incremento de tiempo cuando el tren está traccionando (2.21):

$$E = I \cdot U \cdot \Delta t \quad (2.21)$$

Donde

E es la energía consumida en cada Δt

Cuando el ATO solicita fuerza máxima se puede obtener la intensidad a partir de la curva de intensidad máxima del equipo de tracción que proporciona el fabricante en función de la velocidad (Figura 2.5). Estas curvas teóricas del fabricante se han contrastado a partir de registros reales tomados en los trenes de Metro de Madrid, Bilbao y Barcelona. Se concluye que para mejorar la precisión del modelo de consumo es conveniente realizar un ajuste de las curvas a partir de los registros reales como se muestra en el siguiente apartado.

Por otro lado, cuando el ATO solicita un porcentaje de fuerza respecto de la máxima, la intensidad se reducirá también respecto de la intensidad máxima en la misma proporción que la fuerza (%T). Esto es cierto si suponemos que el rendimiento del equipo de tracción es igual al que se obtiene a partir de las curvas de tracción máxima que proporciona el fabricante (2.22):

$$\eta = \frac{F_m \cdot V}{I(V) \cdot U} \Rightarrow \frac{F_{\max}(V) \cdot V}{I_{\max}(V) \cdot U} = \frac{F_m(V) \cdot V}{I(V) \cdot U} \Rightarrow I(V) = \frac{F_m(V)}{F_{\max}(V)} \cdot I_{\max}(V) = \%T \cdot I_{\max}(V) \quad (2.22)$$

Donde:

η es el rendimiento de los motores (calculado a partir de las curvas a fuerza máxima)

F_m es la fuerza del motor

$I(V)$ es la corriente consumida o generada a la velocidad V

U es la tensión nominal

$F_{\max}(V)$ es la fuerza máxima posible a la velocidad V

$I_{\max}(V)$ es la corriente máxima a la velocidad V

Sin embargo, se ha comprobado a partir de medidas reales que el error en la estimación del consumo por suponer el rendimiento a tracción reducida igual que a tracción máxima es importante, y se ha considerado necesario modelar a partir de medidas la variación del rendimiento con el porcentaje de fuerza %T que solicita el ATO. Esto es especialmente importante al comparar conducciones que regulan velocidad aplicando una tracción reducida (la suficiente para mantener velocidad) con ciclos deriva-remotor de igual velocidad media, pero donde el remotor se realiza a tracción máxima (de mejor rendimiento). El apartado 2.2.4.2 describe este modelo del rendimiento en función del %T, que permite calcular el consumo del tren cuando circula a tracción reducida como (2.23).

$$E = \frac{F_m \cdot V}{\eta} \quad (2.23)$$

2.2.4.1 Ajuste del rendimiento en función de la velocidad a tracción máxima

El rendimiento de los motores de un tren, como ya se ha visto, responde a la ecuación (2.24), que indica el consumo eléctrico necesario para aplicar el trabajo mecánico solicitado. Se han tomado registros embarcados en trenes en circulación comercial de velocidad, tensión, corriente y esfuerzo motor, que han hecho posible ajustar el rendimiento a tracción máxima. En la Figura 2.10 se muestran los puntos de rendimiento calculados y su variación en función de la velocidad del tren (2.24).

$$\eta = \frac{F_m(V) \cdot V}{U \cdot I(V)} \quad (2.24)$$

En (2.25) se muestra el ajuste del rendimiento a tracción máxima mediante rectas a tramos para trenes de la serie 3000 de Metro de Madrid, y se representa en la Figura 2.10. Se han considerado como puntos a tracción máxima aquéllos en los que el %T medido es mayor de 0.95 y que en la figura se representan en color azul oscuro.

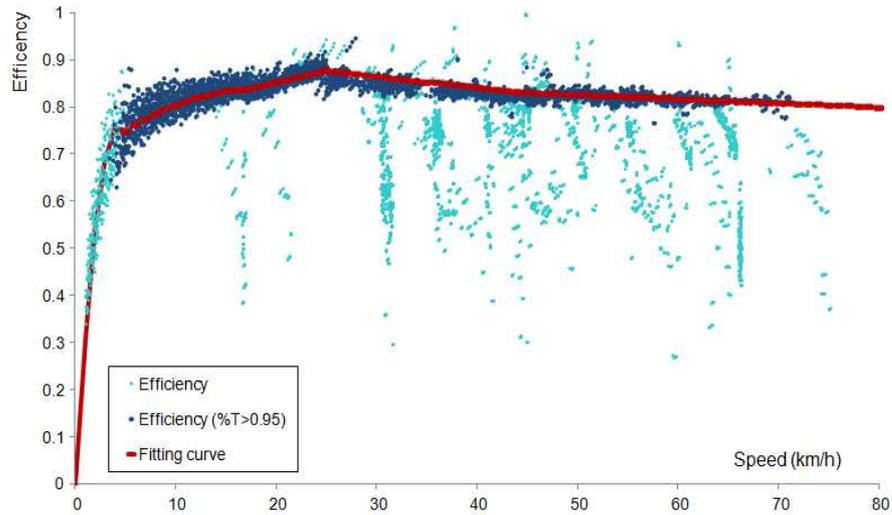


Figura 2.10: Variación del rendimiento con la velocidad en registros tomados en la serie 3000 de Metro de Madrid

$$\eta(V) = \begin{cases} -0.039 \cdot v^2 + 0.346 \cdot v & \text{si } 0 < v \leq 5 \text{ km/h} \\ -5 \cdot 10^{-4} \cdot v^2 + 0.018 \cdot v + 0.671 & \text{si } 5 < v \leq 17 \text{ km/h} \\ 4.95 \cdot 10^{-3} \cdot v + 0.752 & \text{si } 17 < v \leq 25 \text{ km/h} \\ -2.38 \cdot 10^{-3} \cdot v + 0.936 & \text{si } 25 < v \leq 44 \text{ km/h} \\ -9 \cdot 10^{-4} \cdot v + 0.870 & \text{si } v > 44 \text{ km/h} \end{cases} \quad (2.25)$$

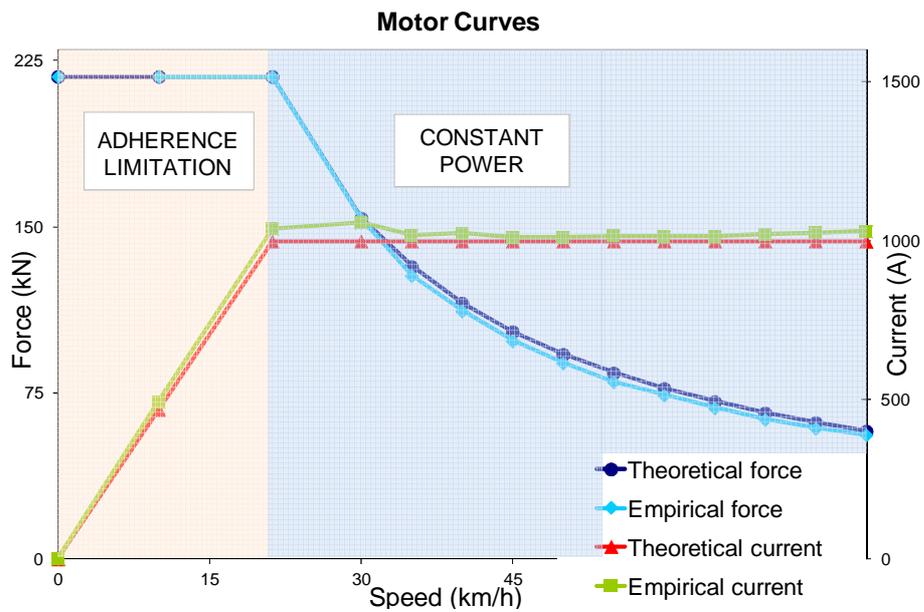


Figura 2.11: Curvas de esfuerzo del motor teóricas y obtenidas de registros para la serie 3000 de Metro de Madrid

En la Figura 2.11 se representan las curvas de intensidad y fuerza máximas teóricas y también las recalculadas experimentales a partir del rendimiento ya ajustado (2.25), y considerando la tensión con su valor nominal para compararlas con las teóricas. La ventaja de ajustar el rendimiento a partir de medidas en lugar de ajustar directamente la intensidad, es que esta última depende de la tensión de catenaria a la que se tomó la medida (si la tensión era un poco menor que la nominal la intensidad será un poco mayor para proporcionar la potencia requerida). El rendimiento sin embargo, depende directamente de la potencia suministrada (intensidad por tensión), y se pueden ajustar estos productos aunque cada punto de rendimiento medido esté tomado a distinta tensión.

2.2.4.2 Ajuste del rendimiento respecto al porcentaje de tracción

El ajuste anterior de los rendimientos e intensidad a fuerza máxima en función de la velocidad permite calcular los consumos cuando el ATO solicita tracción máxima. Se ha observado en los registros que si se solicita tracción reducida se produce una caída del rendimiento en función del valor de la reducción %T. El fabricante no suele proporcionar el conjunto de curvas de fuerza e intensidad del motor para distintos valores de %T, disponiéndose únicamente de la curva de corriente correspondiente a la fuerza máxima. En consecuencia es necesario un modelo que reproduzca cuánto empeora el rendimiento a medida que se disminuye el %T. Los resultados que se obtienen son válidos para cada caso particular al obtenerse de ajustes empíricos.

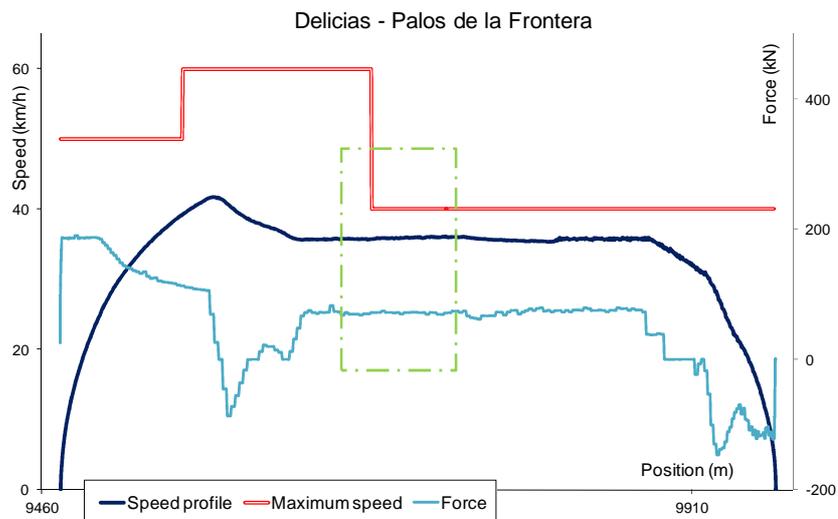


Figura 2.12: Ventana de tiempo seleccionada para medir valores del rendimiento en función del %T

Para obtener valores del rendimiento en función del %T se han buscado en los registros periodos de tiempo en los que velocidad y fuerza sean prácticamente constantes, es decir, periodos que se corresponden con tramos de pendiente constante y en los que en consecuencia, el tren mantiene velocidad aplicando justo la tracción reducida necesaria para compensar las resistencias. Se puede ver un ejemplo en la Figura 2.12. En cada una de las ventanas de tiempo observadas se halla la media de las velocidades, porcentaje de fuerza y rendimiento. De esta manera se obtienen puntos de rendimiento en función del %T. En la Figura 2.13 se representan los puntos de rendimiento medidos en función del %T y su ajuste mediante rectas a tramos.

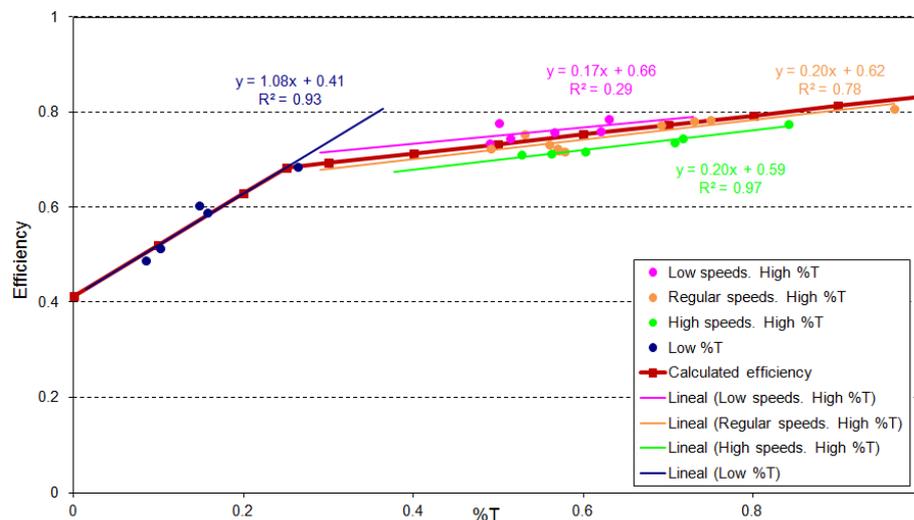


Figura 2.13: Cálculo del rendimiento para la serie 3000 de Metro de Madrid

Para valores de %T > 0.25 se han ajustado tres rectas que agrupan puntos en el mismo rango de velocidades (velocidades bajas 30km/h < V < 40km/h, medias 40km/h < V < 55km/h y altas V > 55km/h). Por debajo de 30km/h no existen puntos ya que el tren no regula en circulación comercial a velocidades tan bajas. La pendiente de las rectas ajustadas no depende significativamente de la velocidad, e indica cuánto disminuye el rendimiento al solicitar una tracción reducida. Aunque se aprecia que los rendimientos ajustados a velocidades bajas son ligeramente mayores que los ajustados a velocidades altas, las variaciones no se han considerado significativas por no disponer de suficientes puntos de medida para tratar de ajustar las pequeñas diferencias. En conclusión, se ha aproximado el rendimiento mediante una sola recta cuya pendiente se puede considerar una penalización del rendimiento por aplicar

tracciones reducidas. Cuanto mayor sea esta penalización, menos eficientes serán las conducciones que regulan velocidad frente a conducciones equivalentes en tiempo que realizan ciclos deriva-remotor.

Para valores de $\%T < 0.25$, no se dispone de suficientes puntos que permitan distinguir por velocidades, y el ajuste del rendimiento se hace igualmente mediante una sola recta a partir de los puntos disponibles.

Se han ajustado por tanto dos rectas de rendimiento diferentes en función del $\%T$, como indica (2.26).

Como se ha mencionado, en este caso no se dispone de suficientes ventanas de registros de velocidad constante que permitan el ajuste del rendimiento a tracción reducida en función de la velocidad. Sin embargo sí se consideró esta variación en el cálculo del rendimiento a fuerza máxima (2.25) por disponerse de una gran cantidad de medidas a tracción máxima. Como se verá en el apartado siguiente de validación de modelos los resultados experimentales han validado esta aproximación.

$$\eta(\%T) = \begin{cases} 1.08 \cdot \%T + 0.41 & \text{si } \%T < 0.25 \\ 0.20 \cdot \%T + 0.63 & \text{si } \%T \geq 0.25 \end{cases} \quad (2.26)$$

2.3 Validación de los modelos y el simulador

Los modelos descritos se implementaron e integraron en un simulador a tiempo discreto según la Figura 2.1. La herramienta desarrollada permite la simulación automática tanto de una marcha en concreto dados sus parámetros de configuración ATO, como de todas las posibles marchas que el quipo ATO puede ejecutar entre dos estaciones. Uno de los objetivos de esta tesis es conseguir una correcta definición de los parámetros, así como la validación y ajuste del simulador para obtener resultados lo más precisos posibles. El fin último es que la metodología y el simulador sean aplicables a casos reales, y que los diseños realizados sean implementables minimizando las pruebas de validación en tren y el rediseño de marchas no confortables. Para ello se obtuvieron medidas reales de las variables de cálculo durante el funcionamiento normal del los trenes que han permitido ajustar y validar cada uno de los modelos y el simulador en su conjunto.

2.3.1 Caso ejemplo

Para la validación del simulador y posterior rediseño de marchas en servicio se escogió la Línea 3 de Metro de Madrid (Figura 2.14). Se trata de una línea con 17 estaciones por cada sentido con una longitud media de interestación de 810 m y un perfil del terreno muy irregular, con pendientes de hasta 50mm/m.



Figura 2.14: Caso ejemplo considerado. Línea 3 de Metro de Madrid

Los trenes en circulación son las unidades de la serie 3000 (s3000) construidos por CAF, con equipos de tracción de Bombardier y ATO de Dimetronic [Invensys Dimetronic Signals]. Circulan en una composición de 4 coches motores (dos de ellos con cabina), de 321kW cada uno, y 2 remolques. Hay 2 bogies por coche motor y 2 motores por cada bogie, en total 16 motores de 80.25kW cada uno. La longitud total es de 90m y la tara del tren de 160Tn, con capacidad total de 736 pasajeros más otros dos con movilidad reducida.

En la red eléctrica hay 6 subestaciones que suministran corriente a una tensión nominal de 1500VDC con catenaria rígida.

2.3.2 Registros embarcados

Para obtener valores reales de las variables de cálculo durante el servicio normal de un tren se tomaron registros embarcados en las unidades de tracción de varios trenes en circulación normal. Los registros se realizaron mediante la recogida de datos en un ordenador portátil conectado a través de interfaz *RS-232* a la VCU (Sistema de Control de Tracción) de una de las cabinas del tren. El ordenador registró en intervalos de tiempo muy pequeños (normalmente 64 ms) las señales de tensión de línea, corriente, aceleración, fuerza eléctrica, freno neumático, carga de la unidad, consigna de ATO, códigos ATP y velocidad, además de tres señales digitales: captación del imán, ATP activado y ATO activado.

Una vez tomadas las medidas, éstas se exportaron a archivo de texto para su posterior tratamiento y conversión a hoja de cálculo *Microsoft Excel*. Se aplicaron los factores de conversión a las señales registradas, necesarios para obtener los datos en unidades del sistema internacional.

El proceso de validación es el siguiente: los datos registrados se utilizan como variables de entrada en cada uno de los modelos, después se realiza el cálculo de los algoritmos correspondientes, y los resultados se comparan de nuevo con los datos registrados. Se obtiene así el error de cálculo de cada uno de los módulos de forma independiente, comparando los resultados de simulación con los datos registrados. Este procedimiento permite identificar las fuentes de error durante la construcción del simulador y mejorar sólo aquellos modelos que lo requieran. Facilita también la adaptación a otros sistemas, como el de Metro de Bilbao, sustituyendo y validando solo los módulos necesarios, fundamentalmente el correspondiente al equipo ATO.

2.3.3 ATO

En el caso del modelo de ATO la comparación entre la consigna real de ATO y la simulada en la interestación de Almendrales se puede ver en la Figura 2.15 para los tramos de recorrido en los que no se aplica freno. Se observa cómo la coincidencia de ambas consignas es prácticamente exacta.

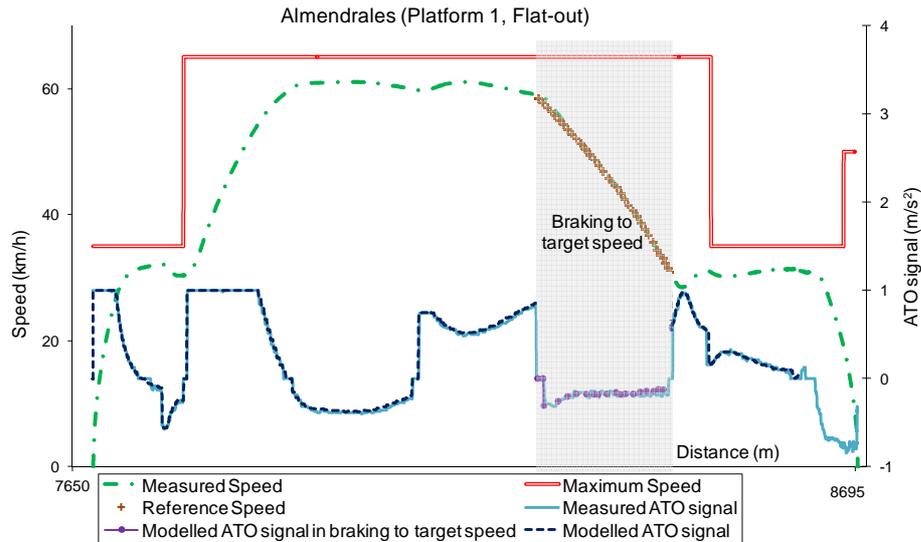


Figura 2.15: Comparación de la señal de ATO simulada y registrada

Para el caso de freno por reducción en el límite de velocidad máxima, la Tabla 2.2 compara algunos de los puntos de detección de comienzo de freno obtenidos de las medidas, con los obtenidos de las simulaciones. El error medio entre ambos (considerándolos todos) es del 2.0% con respecto a la longitud recorrida de cada interestación y del 0.8% respecto a la longitud total de cada interestación.

Station	MEASUREMENTS	SIMULATIONS	ERROR		
	Starting point for braking to target speed (m)		Difference (m)	(%) with respect to travelled distance	(%) with respect to inter-station distance
AR2	809.61	809.53	0.08	0.07	0.02
VR2	1263.30	1261.83	1.47	1.00	0.30
PE2	1985.58	1983.34	2.24	0.58	0.39
S2	2939.65	2933.52	6.13	1.92	0.63
EM2	4553.20	4550.86	2.34	0.47	0.30
DL2	5616.83	5611.16	5.67	2.10	0.73

Tabla 2.2: Comparación entre datos reales y simulados de comienzo de reducción de freno en algunas interestaciones

En la Figura 2.16 se muestra como ejemplo una simulación completa en comparación con la marcha real registrada en la que se indica el punto de detección de comienzo de freno, que es el mismo tanto en el registro como en la simulación.

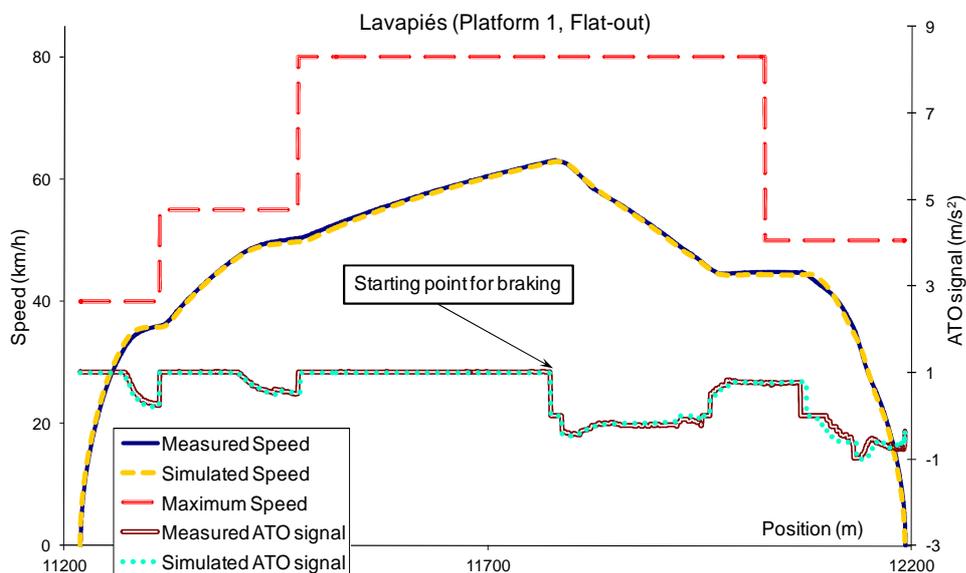


Figura 2.16: Velocidad y señal de ATO registradas y simuladas. Comienzo de freno por reducción de velocidad máxima indicado en el gráfico

De igual forma, algunos de los puntos de detección de freno en parada simulados se comparan en la Tabla 2.3 con los obtenidos de registros resultando una diferencia media (considerándolos todos) del 0.8% con un máximo del 4.5%

Station	SIMULATIONS	MEASUREMENTS	ERROR	
	Kp (m)	Kp (m)	(m)	(%)
CL1	5901.22	5900.08	1.14	0.10
L1	9359.16	9364.48	-5.32	-0.68
C1	13079.11	13081.02	-1.90	-0.33
PE1	13513.16	13519.37	-6.21	-1.45
AR2	1027.21	1026.56	0.65	0.14
VR2	1466.76	1467.57	-0.81	-0.19

Tabla 2.3: Comparación entre datos reales y simulados de comienzo de frenado de detención

Los datos registrados se utilizaron también para verificar la salida de ATO (consigna de tracción) en el modo de freno (2.3) por reducción de velocidad máxima. La velocidad de referencia se calculó con la posición y velocidad del punto de comienzo de freno, el valor de la velocidad objetivo, y su punto kilométrico. A partir de

ahí, se calculó la consigna de ATO teniendo en cuenta los ciclos de cálculo propios del equipo real ATO y el retardo entre las medidas de velocidad y respuesta de ATO. La curva de referencia hallada así como la velocidad finalmente seguida por el tren y la consigna de ATO, se muestran en la Figura 2.15 junto con datos reales que permiten ver la exactitud de las simulaciones.

2.3.4 Motor

Para verificar la precisión del modelo del motor la señal de ATO registrada se ha introducido en la ecuación (2.8), además de la curva de esfuerzo máximo. La fuerza resultado que se obtiene del modelo se compara con la medida en la Figura 2.17, comprobándose así el ajuste conseguido. El modelo considera la limitación de jerk en las transiciones de fuerza como se muestra en la Figura 2.18, donde se comprueba que tanto en la simulación como en el registro se suavizan dichas transiciones. La figura sirve también como comparación de la marcha simulada y la registrada cuando se diseña la marcha mediante deriva (a 50 km/h) y remotor (a 30 km/h).

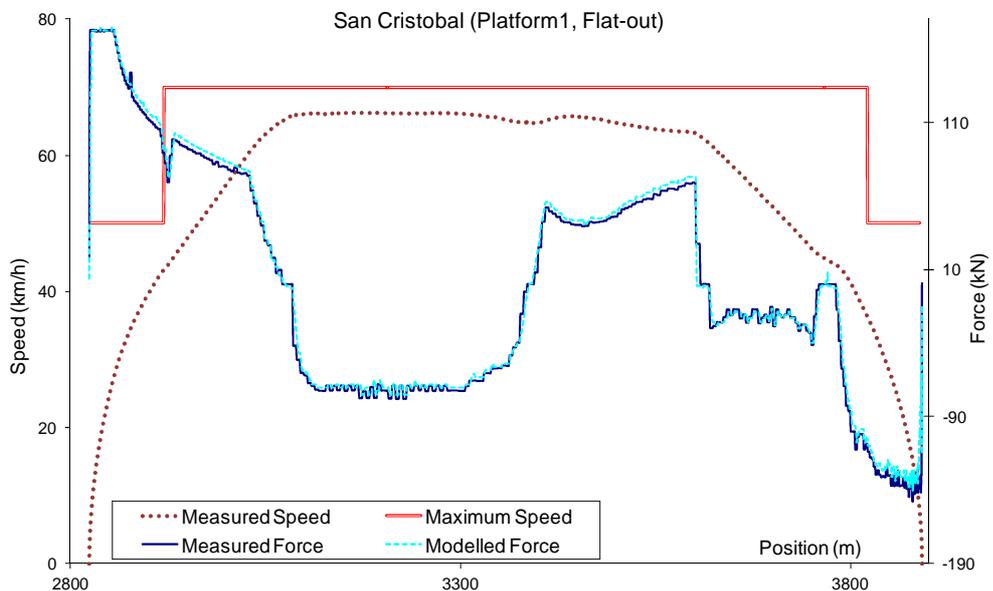


Figura 2.17: Esfuerzo medido y simulado

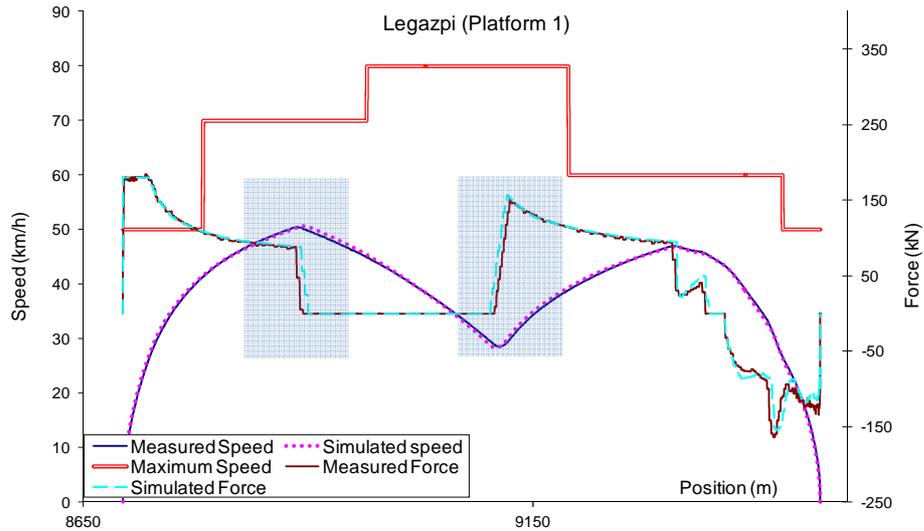


Figura 2.18: Marcha con consigna de deriva-remotor simulada y registrada. Simulación de la limitación de jerk sombreada

2.3.5 Dinámica

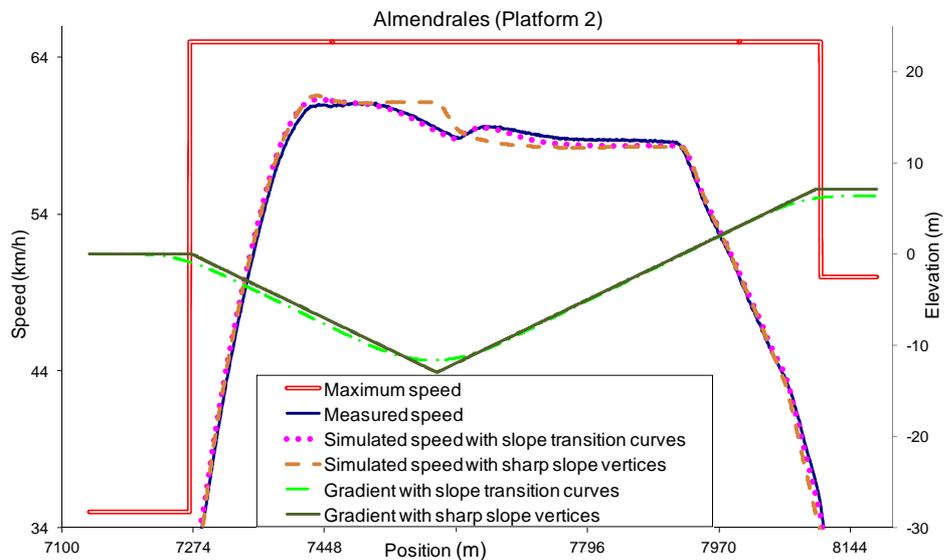


Figura 2.19: Comparación de simulaciones con distinta consideración del gradiente

A la hora de simular existe una mejora en la precisión importante considerando acuerdos de transición entre pendientes y la masa del tren distribuida a lo largo de toda su longitud, frente a tener en cuenta únicamente puntos de cambio de pendientes que suponen abruptos vértices, y un tren con masa puntual concentrada en su centro de masas. Se muestra un ejemplo en la Figura 2.19. Aunque la diferencia entre ambas

simulaciones es apreciable siendo mucho más precisa la primera, estos detalles son casi siempre simplificados en la literatura. Como ya se justificó anteriormente, el nivel de detalle requerido en esta aplicación hace que sea necesario modelar el tren como su masa distribuida sobre un gradiente del terreno variable y continuo, especialmente en líneas metropolitanas con pendientes fuertes y cambiantes como en este caso ejemplo.

2.3.6 Consumo

Gracias a las medidas ha sido posible también ajustar los modelos de consumo de energía y el modelo de rendimiento asociado. Los resultados del cálculo de energía consumida y los reales registrados en varias interestaciones se muestran en la Tabla 2.4. La diferencia media entre ellos obtenida considerando todas las interestaciones es del 1.5%.

Stations	MEASUREMENTS		MODEL		ERROR	
	Distance (m)	Running Time (s)	E (kWh)	E (kWh)	(kWh)	(%)
M2	402.70	52.47	9.94	10.01	0.07	0.71
AR2	474.14	56.18	2.65	2.71	0.06	2.35
VR2	430.76	53.50	3.16	3.24	0.08	2.39
PE2	572.25	64.63	15.38	15.40	0.01	0.10
S2	974.85	92.08	3.51	3.49	-0.02	-0.48
LV2	466.80	58.17	2.51	2.57	0.05	2.07
EM2	780.60	75.06	7.61	7.78	0.17	2.23

Tabla 2.4: Comparación de los resultados del modelo de consumo con datos reales en algunas interestaciones

2.3.7 Modelo completo

Stations	MEASUREMENTS		SIMULATIONS		ERROR			
	R. Time (s)	E (kWh)	R. Time (s)	E (kWh)	R. Time (s)	E (kWh)	R. Time (%)	E (%)
PE2	65.78	15.68	66.55	15.92	0.77	0.24	1.17	1.51
C2	54.46	2.81	55.05	2.79	0.59	-0.02	1.09	-0.73
S2	93.81	2.86	94.70	2.85	0.89	0.00	0.95	-0.01
LV2	58.81	2.55	60.45	2.50	1.64	-0.06	2.79	-2.25
EM2	76.98	7.56	75.40	7.52	-1.58	-0.03	-2.05	-0.42
PF2	62.71	2.46	63.05	2.44	0.34	-0.02	0.54	-0.82

Tabla 2.5: Resultados de simulaciones completas frente a datos medidos en algunas interestaciones

Finalmente, después de todos los ajustes por cada módulo, se valida el modelo con todos sus módulos integrados. Se ha realizado la comparación entre simulaciones completas y datos registrados mostrándose algunos ejemplos en la Tabla 2.5. Se obtiene una diferencia del 4.2% en consumo y del 1.0% en tiempos de recorrido en media considerando todas las interestaciones.

2.4 Diseño de las marchas de regulación ATO

Llegados a este punto es importante recordar que el objetivo principal por el que se ha desarrollado un simulador con módulos detallados del funcionamiento de cada equipo del tren, y se ha puesto tanto empeño en su validación, es poder diseñar el conjunto de marchas necesario por cada interestación, que se programarán en los equipos ATO para su uso por el sistema de regulación del tráfico. La marcha 0, o marcha tendida, se caracteriza por ser la que utiliza el menor tiempo de recorrido al utilizar las máximas aceleraciones y deceleraciones, considerando las velocidades máximas permitidas. Las otras dos (Metro de Bilbao), o tres marchas (Metro de Barcelona y Madrid), son más lentas y en consecuencia deberían consumir menos energía. La diferencia de tiempo entre ellas (unos 5s normalmente) suele estar definida por la explotación metropolitana en concreto, siendo necesaria para el correcto funcionamiento del regulador de tráfico en tiempo real.

Cada marcha se define mediante unos parámetros configurables propios del equipo ATO. En el ATO de Metro de Bilbao estos son la aceleración, el jerk máximo, la deceleración de frenado y la velocidad de remotor. En los equipos ATO de Dimetronic de Metro de Barcelona y Madrid son: la deceleración de frenado, la velocidad de deriva, la velocidad de remotor y la velocidad de regulación. Centrándonos en el caso ejemplo de Metro de Madrid, vemos que los puntos de deriva y remotor se definen con velocidades y no mediante puntos espaciales. Esta particularidad resalta la importancia de obtener simulaciones precisas, puesto que un error de pocos metros en un punto de deriva podría llevar al tren a derivar en un lugar inadecuado, como podría ser el final de una rampa muy pronunciada. Esto daría como resultado marchas tremendamente incómodas para los viajeros por la sensación de caída que se produce en el interior del tren. En consecuencia, una marcha incómoda podría ser aceptada de forma inadecuada por el simulador y ser programada en el ATO, obligando a su posterior rediseño tras comprobar que no es válida en las pruebas reales de validación con el tren.

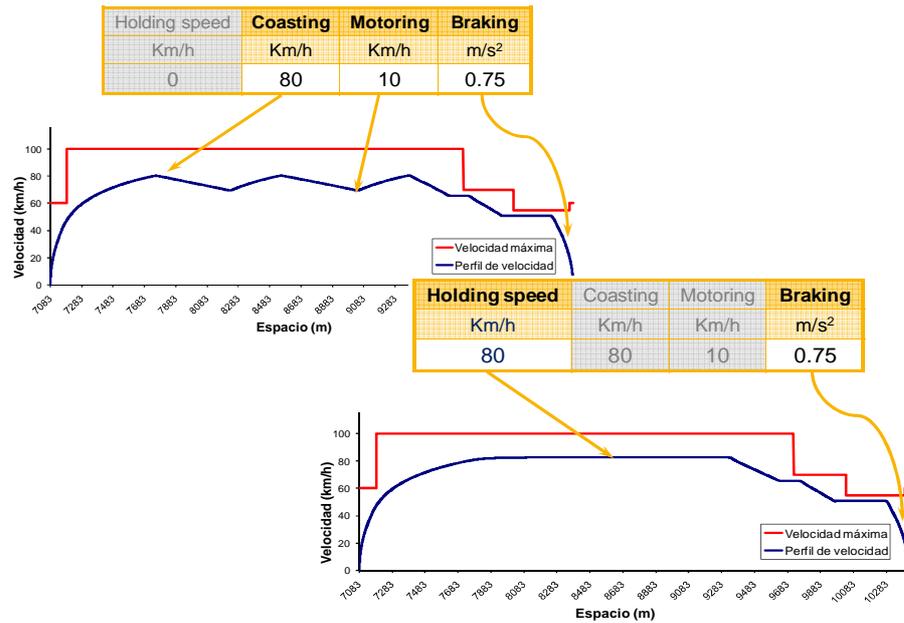


Figura 2.20: Incompatibilidad de consignas de regulación y deriva-remotor en la misma marcha

En el sistema de ATO considerado en el caso ejemplo, una orden de deriva y una orden de regulación son incompatibles en la misma marcha. Es decir, si el valor de la velocidad de deriva recibido por baliza es distinto de 0, entonces el valor de la velocidad de regulación debe ser 0, y viceversa (ver Figura 2.20). En consecuencia, el espacio de soluciones de cada interestación está formado por marchas exclusivamente de regulación o con ciclos de deriva-remotor. Tradicionalmente se ha considerado más eficiente una marcha con deriva, sin embargo, al tener en cuenta restricciones de confort, es posible que se sea necesario diseñar una marcha con regulación, especialmente en recorridos con fuertes rampas.

El problema de diseño de marchas parte de que cada posible conducción tiene por atributos un consumo y un tiempo de recorrido. Los tiempos de recorrido de las cuatro marchas a diseñar idealmente han de cubrir el rango de tiempos definido (típicamente entre 10 y 20 segundos), y deberían de estar uniformemente distribuidas para el buen funcionamiento del regulador de tráfico. El consumo de cada marcha representa su coste asociado, definiendo un problema típico de diseño multiobjetivo en el que es necesario encontrar un compromiso entre los tiempos de recorrido y los costes.

En teoría de la decisión, este tipo de problemas se estudian representando el espacio de soluciones en un gráfico tiempo-consumo sobre el que se calcula la envolvente de soluciones óptimas denominada *curva de Pareto* (representada en

nararanja en la Figura 2.21). Si el espacio de soluciones es suficientemente denso, las soluciones deberán de estar necesariamente sobre esta curva ya que cualquier otro punto fuera de ella está *dominado*, es decir, hay otro punto de la curva que tiene igual tiempo de recorrido y menor consumo.

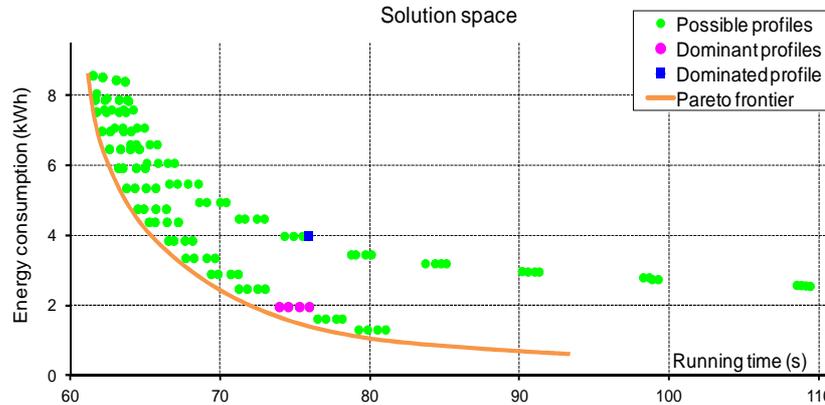


Figura 2.21: Gráfico tiempo-consumo con el espacio de soluciones, curva de Pareto y representación del criterio de dominación

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

A continuación se explican los criterios empleados a la hora de diseñar marchas económicas con un compromiso entre el consumo y el tiempo de recorrido. Estos criterios se aplican para las marchas 1, 2 y 3 (si existe), puesto que la marcha 0 es siempre la más rápida (la tendida).

2.4.1 Criterio de dominación

De acuerdo a este criterio, las soluciones con el tiempo de recorrido deseado que se encuentran sobre la curva de Pareto son las óptimas, es decir, las de menor consumo y por lo tanto a seleccionar. En la Figura 2.21 se muestra un ejemplo en el que una marcha es dominada por otras cuatro con el mismo tiempo de recorrido o incluso más rápidas.

2.4.2 Criterio de sensibilidad

La forma típica de la curva óptima de soluciones disminuye progresivamente su pendiente desde la marcha tendida a medida que aumenta el tiempo de recorrido. En análisis de sensibilidad, esto quiere decir que cerca de la marcha tendida el coste energético asociado a cada segundo es muy alto, y disminuye progresivamente hasta valer prácticamente 0 al final de la curva (insensibilidad). Por lo tanto, conviene que el rango de tiempos de regulación se sitúe, en lo posible, en la zona donde el coste del segundo es alto, y aprovechar al máximo todo el rango de tiempos sensible. Es preferible no programar (ni ejecutar por tanto) una marcha lenta si no lleva asociado un ahorro energético, ya que si es preciso por regulación perder más tiempo, se puede esperar a la siguiente estación para ejecutar una marcha más eficaz.

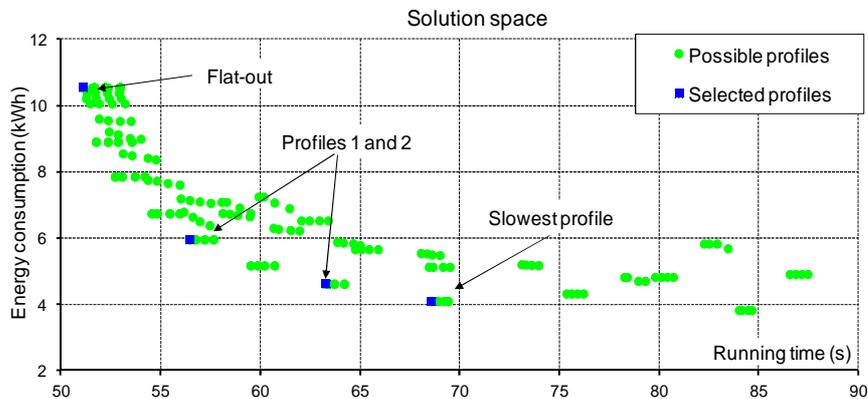


Figura 2.22: Criterios de sensibilidad y distribución uniforme de tiempo

Para ilustrar lo anterior, supongamos que se quieren diseñar 3 marchas de regulación además de la tendida en el ejemplo de la Figura 2.22. Se ha situado la tercera marcha en el comienzo de la zona plana de la curva de Pareto, donde no es posible conseguir más ahorro de energía con un tiempo de recorrido mayor. Siempre que sea posible, se deberá aprovechar completamente la zona de sensibilidad alta de la curva, aumentando el rango de tiempo de regulación al máximo posible.

2.4.3 Criterio de distribución uniforme de tiempo

Como ya se ha adelantado, un tercer criterio de selección de marchas corresponde a la distribución uniforme de los tiempos de recorrido de las marchas, dentro del margen de regulación. En el caso en que se diseñan cuatro marchas de regulación, la

diferencia entre los tiempos de recorrido de marchas consecutivas debería de ser aproximadamente un tercio de la diferencia de tiempos entre marcha 0 y marcha 3. Este criterio afecta a la selección de las marchas 1 y 2. Como ejemplo de aplicación se presenta la Figura 2.22. El diseño propuesto en este caso comienza por la aplicación del criterio de sensibilidad para aprovechar al máximo el rango de sensibilidad energética, aumentando el tiempo de recorrido de la marcha más lenta hasta el comienzo de la zona plana de la curva de Pareto. A continuación se aplica el criterio de distribución temporal uniforme para situar las marchas 1 y 2.

2.4.4 Restricciones de confort

Para evitar que el diseño de marchas que se va a implementar provoque molestias en los viajeros, es necesario incluir criterios de confort en la selección de las marchas óptimas. Así, el simulador indicará que la marcha no es confortable si incumple alguna de las condiciones de confort modeladas. Estas condiciones, por tratarse de valoraciones subjetivas, se definen en colaboración con la empresa operadora en cuestión. En el caso de Metro de Madrid las condiciones se detallan en los siguientes apartados.

2.4.4.1 Velocidad mínima en toda la vía

La velocidad del tren nunca debe estar por debajo de este límite inferior excepto en el arranque y en el freno final. Para los diseños que se realizarán a continuación se considerará el límite en 20km/h.

2.4.4.2 Número máximo de remotores

En caso de que exista una consigna de ciclos deriva-remotor, las velocidades de dicha consigna tendrán un valor tal que el número de ciclos resultante sea menor que este límite máximo para cada interestación. De esta manera se evita una excesiva sensación de “tirones” para el viajero durante el recorrido. En el caso de estudio se considerará un máximo de 3.

2.4.4.3 Rampa máxima para corte de tracción

Se trata de evitar con este parámetro la sensación de caída que se puede producir ante corte de tracción (deriva) mientras el tren sube una pendiente demasiado pronunciada. El valor máximo de esta rampa se ha fijado en 25 mm/m en nuestro caso ejemplo.

2.4.4.4 Duración mínima del modo

Se limita también el tiempo mínimo durante el cual el tren debe permanecer en un mismo modo de deriva o de remotor, para evitar de nuevo la sensación de “tirones” al viajero. Se ha establecido este límite en 50s.

2.4.5 Restricciones operativas

Además de las velocidades máximas de seguridad, existen unas velocidades mínimas que también se deben respetar. Estos valores mínimos de velocidad se calculan para evitar el desgaste excesivo de rueda y carril al paso de tren por curvas debido a un valor bajo de peralte. Se puede ver un ejemplo en la Figura 2.23. El simulador indicará cuáles de las posibles combinaciones de las órdenes de ATO dan como resultado una marcha que viola dichos límites para evitar de esta forma su selección.

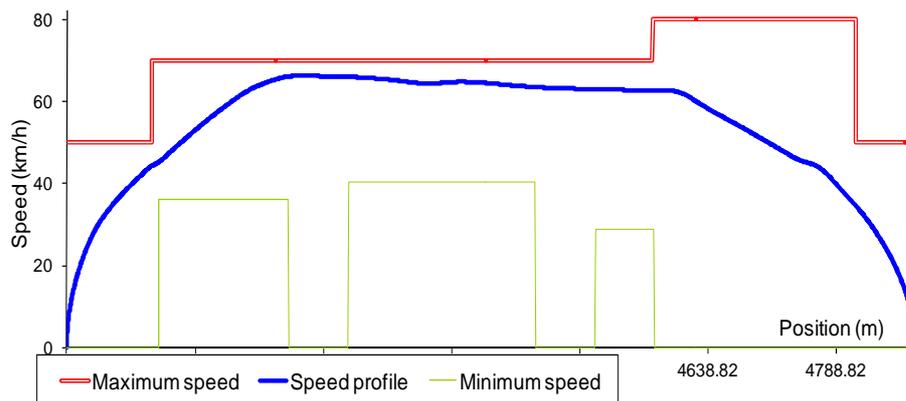


Figura 2.23: Ejemplo de recorrido entre dos estaciones

2.4.6 Diseño de marchas de la Línea 3 de Metro de Madrid

Una vez configurados todos los parámetros del equipo ATO, del material móvil y de vía, establecidas las restricciones de confort y operativas, y validado el simulador, se puede realizar el diseño de las marchas de regulación con vistas a su implementación. La herramienta simulará todas las posibles combinaciones de consignas del ATO y cada marcha simulada estará representada en un gráfico tiempo-consumo, distinguiéndose aquellas marchas que incumplen alguna restricción operativa y/o de confort y que no podrán seleccionarse en el diseño.

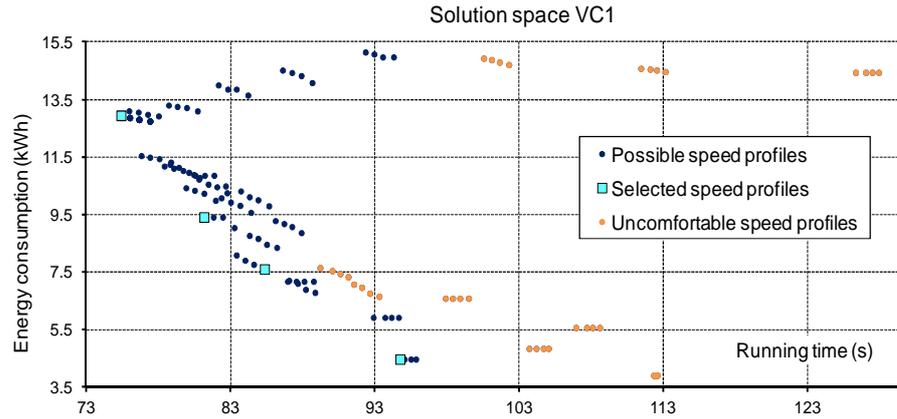


Figura 2.24: Ejemplo de espacio de soluciones y diseño de marchas en la interestación de Villaverde Bajo Cruce a Ciudad de los Ángeles

A partir del espacio de soluciones completo de cada interestación, y seleccionando la marcha tendida como marcha 0, se seleccionan las otras tres marchas de regulación atendiendo a los criterios de dominación, sensibilidad y distribución uniforme de tiempos anteriormente explicados, con una diferencia máxima de 20 s entre la marcha 0 y la 3. Se puede ver un ejemplo en la Figura 2.24.

Se realizó el diseño de las marchas para toda la Línea 3 de Metro de Madrid, se implementó, y en la actualidad se encuentra en servicio. Para poder evaluar los ahorros conseguidos con las nuevas marchas se tomaron registros de nuevo en los trenes siguiendo el mismo procedimiento explicado en el apartado 2.3.2. La Tabla 2.6 muestra la comparación del diseño realizado frente a las marchas antiguas en una interestación. Hasta un 38% de ahorro se consigue con la nueva marcha 1 diseñada.

	Speed Profile	Deceleration	Speed-holding	Coasting speed	Re-motoring speed	Running Time	Energy Consumption	Energy Saving
	Number	(m/s ²)	(km/h)	(km/h)	(km/h)	(s)	(kWh)	(%)
Old Speed Profiles	1	0.65	0	42	10	51.6	4.47	
	2	0.65	0	37	10	51.9	3.68	
	3	0.65	0	35	10	52.1	3.37	
New Speed Profiles	1	0.7	0	30	20	52.1	2.77	38.06
	2	0.6	0	30	20	53.7	2.77	24.85
	3	0.65	30	0	0	61.3	2.32	31.24

Tabla 2.6: Comparación del consumo de energía de las marchas antiguas y las diseñadas en la interestación de Argüelles – Moncloa

Los tiempos de recorrido de las marchas 1 seleccionadas son similares a los tiempos de recorrido de las antiguas. Dado que la marcha 1 es la marcha considerada

como nominal en la planificación, la velocidad comercial no se ve afectada con el diseño. En algunas interestaciones, como por ejemplo en la mostrada en la Tabla 2.6, no había diferencias significativas de tiempo entre las 3 marchas anteriormente en servicio. En estos casos, las marchas 2 y 3 han sido rediseñadas con mayores tiempos de recorrido para poder aprovechar la diferencia de 20s disponible entre la marcha tendida y la más lenta, y de esta manera mejorar la regulación del tráfico además de ahorrar energía.

En la Tabla 2.7 se puede ver el porcentaje medio de ahorro conseguido con cada marcha rediseñada, alrededor del 25%. Considerando que en operación real el 60% de los viajes emplea alguna de las 3 marchas de regulación (marchas 1, 2 y 3), como media se obtiene un ahorro del 13.6% considerando todas las estaciones de Línea 3 con el nuevo diseño.

Marcha	AHORRO (%)	
	Vía 1	Vía 2
1	17,08	23,24
2	20,38	25,36
3	22,75	27,26

Tabla 2.7: Ahorro medio conseguido con las marchas diseñadas

2.4.7 Discusión

Después de la implementación de las marchas diseñadas en la línea fue necesario rediseñar únicamente 8 de las 102 marchas implementadas, lo que demuestra que no se trata de un procedimiento de “prueba y error”, sino de un enfoque sólido basado en simulación precisa de las marchas a implementar.

El diseño de las marchas para Línea 3 presentó algunas dificultades debidas al trazado complicado de la vía. Se trata de interestaciones por lo general muy cortas (sobre todo en la parte antigua de la vía, con recorridos que no llegan a los 500m de longitud), con límites máximos de velocidad muy cambiantes, pendientes muy fuertes (de hasta 50mm/m) y cambios muy bruscos (como por ejemplo de -45mm/m a 45 mm/m), así como límites mínimos de velocidad muy altos.

Se ha tenido especial cuidado respecto al confort en la implementación de las marchas. En muchos casos las marchas diseñadas se implementaban y posteriormente se probaban en servicio, por lo que eran necesarias muchas pruebas hasta encontrar las confortables. Gracias a la definición de criterios concretos y del

simulador, ese procedimiento de prueba y error se evita, asegurando la implementación de únicamente marchas confortables y eficientes. De hecho, la simulación de las marchas en servicio antes del proceso de rediseño reveló que muchas de ellas no cumplían los criterios de confort que se definieron para este diseño.

Tras obtener el espacio de soluciones de todas las interestaciones de la línea se comprobó que únicamente en 4 interestaciones todas las posibles marchas que puede ejecutar el ATO eran confortables y respetaban las velocidades mínimas. Por el contrario hay 18 interestaciones en las que más del 50% de las marchas respetan todas las condiciones, 10 interestaciones donde más del 50% de las marchas no cumplen alguno de los criterios operativos o de confort (1213 de un total de 1716) y 2 interestaciones en las que solamente es posible aplicar marcha tendida. Un ejemplo de esto último es la interestación de San Fermín – Doce de Octubre, donde existe una velocidad mínima muy alta que impide la ejecución de otra marcha que no sea la tendida con los cuatro valores de freno posibles.

Es importante tener en cuenta que el procedimiento descrito responde a la necesidad de llevar a cabo un diseño *off-line*, que posteriormente será ejecutado en diferentes escenarios de tráfico y de número de viajeros. Por lo tanto, no es posible tener en cuenta la variación de la tensión de catenaria o de la carga de viajeros. Para optimizar el sistema sería posible definir diferentes conjuntos de marcha para horas valle y horas punta de regulación si el sistema de regulación lo permitiera. La conveniencia de este diseño se discutirá en el siguiente capítulo.

El modelo de rendimiento desarrollado proporciona además importantes resultados. Dado que el rendimiento decrece con el porcentaje de tracción requerido, marchas con consigna de deriva-remotor parecen ser preferibles frente a marchas de regulación con porcentajes de tracción bajos, al menos con los rendimientos ajustados en este trabajo en los trenes registrados.

Por último, los ahorros altos asociados a las marchas de regulación (alrededor del 25%) muestran la importancia de la correcta planificación de los tiempos comerciales y del sistema de regulación de tráfico, y que son responsables del número de veces que se ejecuta la marcha 0 de consumo máximo (60% aproximadamente) en lugar de una marcha económica. Reduciendo este porcentaje de utilización de la marcha tendida, se generaría un ahorro energético importante que se puede estimar fácilmente a partir de los resultados anteriores.

2.5 Resumen, conclusiones y aportaciones

En este capítulo se ha abordado el problema de la optimización de marchas de regulación ATO con parámetros discretos. La selección de los comandos de ATO que se programan en el sistema de regulación del tráfico se ha hecho normalmente de acuerdo, solamente, a criterios operativos y de confort. Con el procedimiento de diseño mostrado es posible, además de tener en cuenta dichos criterios, obtener importantes ahorros sin degradar los tiempos de recorrido. Además se mejora el proceso de implementación de las marchas al reducir el número de pruebas de validación en tren, gracias a la precisión del simulador y el modelado del confort.

Se ha mostrado la necesidad de realizar cálculos precisos de los tiempos de recorrido, y de la energía consumida para obtener un diseño apropiado de las marchas a implementar. Por ello se ha desarrollado un modelo de simulación detallado de cada uno de los subsistemas que forman un tren. Utilizar modelos matemáticos, como es habitual en la literatura, en lugar de simulación para encontrar la conducción óptima, implicaría incorporar importantes simplificaciones en los modelos y cálculos que rebajarían la exactitud de los resultados y su utilidad práctica.

Los equipos ATO con los que se ha trabajado proporcionan únicamente un rango determinado y discreto de los comandos de ATO. Por lo tanto, hay un número finito y relativamente pequeño de marchas posibles, y en consecuencia todas ellas pueden ser simuladas exhaustivamente. Sobre el espacio de soluciones que se obtiene, se pueden aplicar técnicas de teoría de la decisión para encontrar las soluciones que cumplen un compromiso entre tiempos de recorrido y consumo.

Se ha realizado un diseño para la Línea 3 de Metro de Madrid, que actualmente se encuentra en servicio, por lo que ha sido posible medir los ahorros conseguidos, concluyendo que se obtiene una mejora de aproximadamente el 13% de media en consumo sin afectar a los tiempos de recorrido. Si pensamos en líneas de metro con altas frecuencias es fácil ver cómo estas marchas programadas se pueden repetir muchas veces sistemáticamente, y por lo tanto hacer que los ahorros totales sean aún más significativos.

El correcto modelado del tren, incluyendo un modelo de rendimiento realista en función del porcentaje de tracción que se ajusta a partir de registros tomados en el tren, el desarrollo de un simulador y su proceso de validación, que reproduce la conducción automática de un tren sin simplificaciones importantes, el procedimiento de

selección de marchas óptimas, y la incorporación de criterios de confort en el diseño de marchas, constituyen las aportaciones de este capítulo.

2.6 Bibliografía

- ACAMPORA, G., LANDI, C., LUISO, M. & PASQUINO, N. Optimization of energy consumption in a railway traction system. *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on, 23-26 May 2006 2006. 1121-1126.
- AÇIKBAS, S. & SÖYLEMEZ, M. T. 2008. Coasting point optimisation for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms. *IET Electric Power Applications*, 2, 172-182.
- ALVES, F. T. & PIRES, C. L. Energy saving strategy in São Paulo Metro. *Railway Traction Systems (RTS 2010)*, IET Conference on, 13-15 April 2010 2010. 1-4.
- ASNIS, I. A., DMITRUK, A. V. & OSMOLOVSHII, N. P. 1985. Solution of the problem of the energetically optimal control of the motion of a train by the maximum principle. *USSR Comput. Math. Math. Phys.*, 25, 37-44.
- BIH-YUAN, K., JANG, J. S. R., SHANG-LIN, H., WOLF, E. J. & SANTINI, A. M. A modulized train performance simulator for rapid transit DC analysis. *In: WOLF, E. J. & SANTINI, A. M., eds. Proceedings of the 2000 ASME/IEEE Joint Railroad Conference (Cat. No.00CH37110), 2000/01/01/ 2000 Newark, NJ, USA. IEEE ASME.*
- BOCHARNIKOV, Y. V., TOBIAS, A. M., ROBERTS, C., HILLMANSEN, S. & GOODMAN, C. J. 2007. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways. *IET Electric Power Applications*, 1, 675.
- CUCALA, A. P., FERNÁNDEZ-CARDADOR, A., DOMÍNGUEZ, M., ORTEGA, J. M., RAMOS, L. & GALARRAGA, A. ATO ecodriving design to minimise energy consumption in Metro de Bilbao. *13th International Conference on Design and Operation in Railway Engineering (COMPRAIL 2012)*, 2012 New Forest, UK.
- CHANG, C. S., CHUA, C. S., QUEK, H. B., XU, X. Y. & HO, S. L. Development of train movement simulator for analysis and optimisation of railway signalling systems. *International Conference on Developments in Mass Transit Systems (IEE Conf. Publ. No.453)*, 1998 London, UK. IEE.
- CHANG, C. S. & SIM, S. S. 1997. Optimising train movements through coast control using genetic algorithms. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 144, 65.
- CHANG, C. S. & XU, D. Y. 2000. Differential evolution based tuning of fuzzy automatic train operation for mass rapid transit system. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 147, 206-212.
- CHANG, C. S., XU, D. Y. & QUEK, H. B. 1999. Pareto-optimal set based multiobjective tuning of fuzzy automatic train operation for mass transit system. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 146, 577-583.
- CHUANG, H. J., CHEN, C. S., LIN, C. H., HSIEH, C. H. & HO, C. Y. Design of optimal coasting speed for saving social cost in mass rapid transit systems. *2008 Third International Conference On Electric Utility Deregulation And Restructuring And Power Technologies, Vols 1-6, APR 06-09, 2008 2008 Nanjing, Peoples R. China. 2833-2839.*
- CHUANG, H. J., CHEN, C. S., LIN, C. H., HSIEH, C. H. & HO, C. Y. 2009. Design of Optimal Coasting Speed for MRT Systems Using ANN Models. *Ieee Transactions on Industry Applications*, 45, 2090-2097.
- DE CUADRA, F., FERNANDEZ, A., DE JUAN, J. & HERRERO, M. A. 1996. Energy-saving automatic optimisation of train speed commands using direct search techniques. *In: ALLAN, J., BREBBIA, C. A., HILL, R. J., SCIUTTO, G. & SONE,*

- S. (eds.) *Computers in Railways V - Vol.1 Railway Systems and Management*. Comput. Mech. Publications Wessex Inst. Technol.
- DOMÍNGUEZ, M., FERNÁNDEZ, A., CUCALA, A. P. & LUKASZEWICZ, P. 2011. Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225, 463-474.
- FERNÁNDEZ CARDADOR, A. 1997. *Modelado, simulación y control de sistemas ferroviarios*. Industrial and Computer Engineering Doctorate, Comillas Pontifical University.
- FOMENTO, M. D. 2010. TRAZADO: INSTRUCCION DE CARRETERA. NORMA 3.1-IC. Ministerio de Fomento.
- FRANKE, R., TERWIESCH, P. & MEYER, M. An algorithm for the optimal control of the driving of trains. *Proceedings Of The 39th IEEE Conference On Decision And Control*, Vols 1-5, 2000 Sydney, Australia. 2123-2128.
- FU, Y., GAO, Z. & LI, K. 2009. Optimization Method of Energy Saving Train Operation for Railway Network. 9, 90-96.
- GOLOVITCHER, I. M. Energy efficient control of rail vehicles. 2001 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. e-Systems and e-Man for Cybernetics in Cyberspace (Cat.No.01CH37236), 2001 Tucson, AZ, USA.
- GOODMAN, C. J. Overview of electric railway systems and the calculation of train performance. IEE Eight Residential Course on Electric Traction Systems, 2004/01/01/ 2004. IEE.
- HOWLETT, P. 2000. The Optimal Control of a Train. *Annals of Operations Research*, 98, 65.
- HOWLETT, P. G. & CHENG, J. 1997. Optimal driving strategies for a train on a track with continuously varying gradient. *Journal Of The Australian Mathematical Society Series B-Applied Mathematics*, 38, 388-410.
- 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.
- INVENSYS DIMETRONIC SIGNALS Control automático de trenes TBS 500. ATP/ATO Distancia objetivo.
- JONG, J. C. 2003. Analytical solutions for predicting train coasting dynamics. *PROCEEDINGS OF THE EASTERN ASIA SOCIETY FOR TRANSPORTATION STUDIES, Vol 4, Nos 1 AND 2*, 4, 91-103.
- JONG, J. C. & CHANG, E. F. 2005a. Models for Estimating Energy Consumption of Electric Trains. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 278 - 291.
- JONG, J. C. & CHANG, S. 2005b. Algorithms for generating Train Speed Profiles. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, pp. 356 - 371.
- KHMELNITSKY, E. 2000. On an Optimal Control Problem of Train Operation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45, 1257.
- KO, H., KOSEKI, T. & MIYATAKE, M. 2004. Application of dynamic programming to the optimization of the running profile of a train. *Computers In Railways IX*, 15, 103-112.
- LANDI, C., LUISO, M. & PASQUINO, N. 2008. A remotely controlled onboard measurement system for optimization of energy consumption electrical trains. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 57, 2250-2256.

- LIU, R. F. & GOLOVITCHER, I. M. 2003. Energy-efficient operation of rail vehicles. *Transportation Research Part a-Policy and Practice*, 37, 917-932.
- LUKASZEWICZ, P. 2001. *Energy Consumption and Running Time for Trains*. PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- MIYATAKE, M. & MATSUDA, K. Optimal speed and charge/discharge control of a train with onboard energy storage devices for minimum energy operation. 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 11-13 June 2008 2008. IEEE.
- P. PUDNEY & HOWLETT, P. 1994. Optimal driving strategies for a train journey with speed limits. *J Austral Math Soc Ser B*, 36, 38-49.
- POKORNY, P. 2008. A remark on energy optimal strategies for a train movement. *ANZIAM Journal; Vol 50 (2008)*.
- SICRE VARA DE REY, C. 2013. *Diseño eficiente de servicios ferroviarios y control de la conducción en Alta Velocidad*. Universidad Pontificia Comillas (Madrid).
- VAŠAK, M., BAOTIĆ, M., PERIĆ, N. & BAGO, M. Optimal Rail Route Energy Management Under Constraints and Fixed Arrival Time. European Control Conference 2009, 2009 Budapest, Hungary.
- WONG, K. K. & HO, T. K. 2004. Coast control for mass rapid transit railways with searching methods. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 151, 365.
- XUN, J., NING, B. & LI, K. P. 2008. Multi-objective optimization method for the ATO system using Cellular Automata. *Computers In Railways XI - Computer System Design And Operation In The Railway And Other Transit Systems*, 103, 173-182.
- YANDAN, L., LIANGJI, H. & TAO, T. 2002. An object-oriented research of automatic train operation simulation system. *Proceedings 2nd International Workshop on Autonomous Decentralized System (Cat. No.02EX619)*. IEEE Comput. Soc IEEE Comput. Soc..
- YANG, L. X., LI, K. P., GAO, Z. Y. & LI, X. 2012. Optimizing trains movement on a railway network. *Omega-International Journal of Management Science*, 40, 619-633.

3 Aprovechamiento de la energía regenerada en la conducción económica

Notación

C	Capacidad del acumulador embarcado (F)
d	Ratio de tensión de descarga de los ultracondensadores (%)
E_{aux}	Energía consumida por los sistemas auxiliares del tren
E_{cons}^t	Energía consumida por el tren t
$E_{cons_sub}^t$	Energía consumida por el tren t y suministrada por subestaciones
$E_{cons_sub,b}^t$	Energía consumida por el tren t y suministrada por subestaciones en el caso base
ECS_s^t	Energía consumida por el tren t en subestaciones en el escenario s
ELC_s	Coficiente de pérdidas en el escenario s
E_{loss_cat}	Pérdidas de energía en catenaria
E_{loss_ohm}	Energía perdida en las resistencias de freno
E_{loss_sub}	Pérdidas de energía en subestaciones
E_{reg}^t	Energía regenerada por el tren t y no utilizada por los sistemas auxiliares
$E_{reg_cat}^t$	Energía regenerada por el tren t enviada de vuelta a catenaria
$E_{reg_sub}^t$	Energía regenerada por el tren t enviada de vuelta a subestaciones
$E_{reg_train}^t$	Energía regenerada por el tren t y utilizada por otros trenes
E_{sto}	Energía almacenada en el acumulador a bordo del tren (positivo) o suministrada por el acumulador (negativo)
I	Corriente de descarga del acumulador (A)
R	Resistencia interna de los ultracondensadores del acumulador embarcado (Ω)

RC_s	Coeficiente de recuperación en el escenario s
U_M	Tensión máxima del acumulador embarcado (V)
U_m	Tensión mínima del acumulador embarcado (V)
W_M	Máxima energía almacenable en el acumulador embarcado
W_R	Pérdidas de energía en el acumulador embarcado
W_U	Energía disponible en el acumulador embarcado
η_c	Rendimiento de los ultracondensadores (%)

3.1 Introducción

Los ferrocarriles metropolitanos utilizan generalmente para su movimiento accionamientos eléctricos formados por motores de inducción. Existen dos modos de funcionamiento: como motores propiamente dichos alimentados por la red y consumiendo la energía necesaria para traccionar el tren, y en modo generador cuando se utiliza el freno eléctrico para reducir la velocidad. Este último se conoce como frenado regenerativo y en él, la energía cinética del tren se transforma en energía eléctrica que se devuelve a la catenaria tras alimentar a los servicios auxiliares (Figura 3.1).

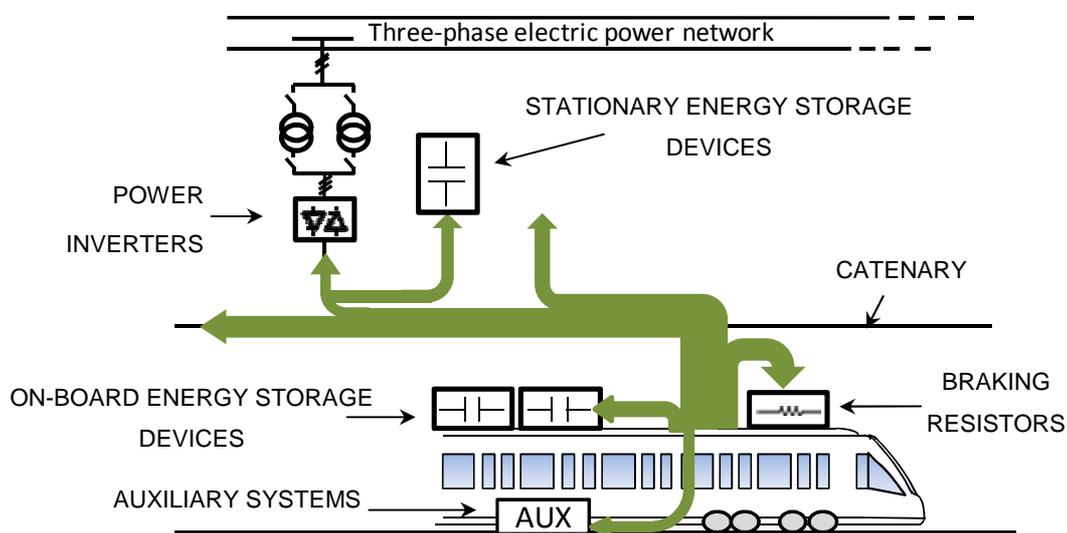


Figura 3.1: Regeneración de energía con el frenado eléctrico del tren

La cantidad de energía regenerada recuperada depende de muchos factores: grado de desaceleración del tren [Chymera et al., 2008], o tipo de conducción [Kim and Lee, 2009], frecuencia del servicio, perfil de potencia de los trenes, configuración de la red de tracción, material móvil, tensión de línea, perfil del terreno, longitud de los sectores eléctricos, sistemas auxiliares del tren [Greatbanks, 2005, Açikbas and Söylemez, 2007, Destraz et al., 2007, Kadhim, 2009, Abrahamsson and Söder, 2011, Malvasi et al., 2011] [Kim and Lee, 2009] y del tamaño y configuración del acumulador embarcado si existe [Barrero et al., 2008]. Esta energía regenerada, puede ser aprovechada en el momento únicamente si existe otro tren que esté acelerando en el mismo sector eléctrico que el primero [Peña-Alcaraz et al., 2012]. Si no existe esta sincronización en los trenes, la energía se intenta devolver a la red. Sin

embargo, cuando la red es de corriente continua (DC), la energía regenerada que no es consumida por otros trenes solamente es aprovechable si existen subestaciones reversibles o equipos de acumulación de energía, en tierra o embarcados, como veremos a continuación (Figura 3.2).

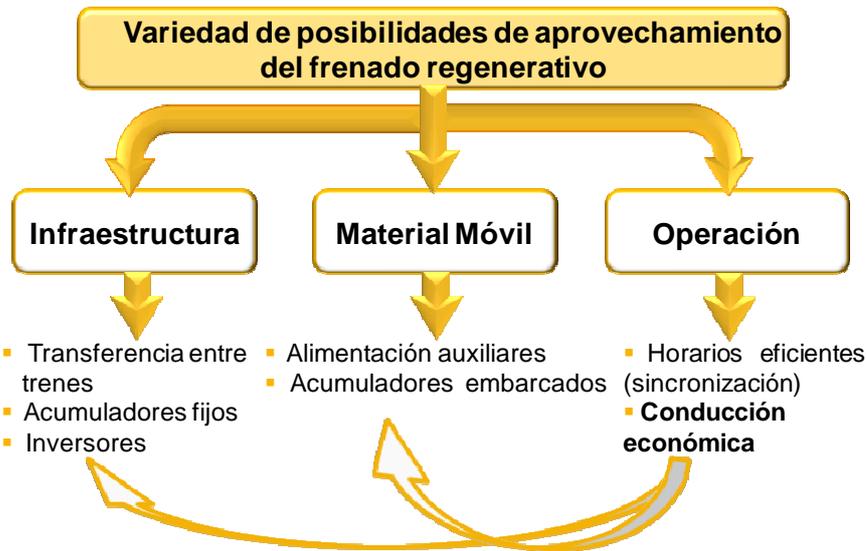


Figura 3.2: Distintas posibilidades de aprovechamiento de la energía regenerada

3.1.1 Devolución de energía a la red

En el caso de sistemas de corriente alterna (AC), la potencia puede transferirse de nuevo a la red si no hay ningún tren cercano al que está frenando. La tensión en la catenaria aumenta cuando un tren regenera, sin embargo, el límite de tensión no suele superarse si no existen varios trenes en el mismo sector eléctrico regenerando a la vez [Greatbanks, 2005]. Esta coincidencia de trenes es difícil que se dé puesto que por lo general, se trata de la red de alimentación de trenes de largo recorrido que no tienen frecuencias tan altas de operación.

Por el contrario, en sistemas DC la potencia no puede devolverse a la red a través de las subestaciones ya que éstas cuentan con filtros de rectificadores que no permiten la conversión de DC a AC. El aprovechamiento de la energía se limita a los casos en los que existe un tren traccionando simultáneamente a otro frenando y en el mismo sector eléctrico. Si no existen otros trenes cercanos, los niveles de tensión en la catenaria subirán hasta los límites permitidos, y el tren tendrá que disipar la energía de frenado en las resistencias de freno en forma de calor.

La energía de freno disponible en el tren suele ser hasta un 40%-45% de la consumida [Steiner and Scholten, 2004] [Gunselmann, 2005] [Açikbas and Söylemez, 2007] [Lee et al., 2007] [Hanmin et al., 2009] [Kim and Lee, 2009], y sin embargo hay medidas que muestran solamente un 19% de recuperación [Adinolfi et al., 1998]. Así pues, más del 25% de la energía regenerada se pierde en las resistencias de freno a bordo de los trenes. Una posibilidad para evitar estas pérdidas debidas a los rectificadores es equipar las subestaciones con inversores de potencia que permitan inyectar la energía regenerada en DC por trenes frenando a la red AC de potencia [Tzeng et al., 1998] [Chuang, 2005] [Chuang et al., 2005] [López López et al., 2011]. Esta estrategia es la utilizada actualmente por ejemplo, en Metro de Bilbao [Lamikiz, 2010].

3.1.2 Sistemas de Acumulación

Debido a los problemas que presenta la regeneración en DC puede ser conveniente, como ya se ha mencionado, dotar al sistema con dispositivos que permitan el almacenamiento de la energía en el propio tren o en las subestaciones. Los dispositivos de almacenamiento pueden ser baterías, volantes de inercia o condensadores. La ventaja que presentan estos acumuladores se encuentra en que no es necesario hacer coincidir la tracción de un tren con el frenado de otro para poder aprovechar la energía generada. Esa energía puede almacenarse hasta el momento en el que otro tren o él mismo la precisen. Como desventajas, existen pérdidas en la carga y descarga del acumulador, y la capacidad de almacenamiento de energía es limitada.

Otras ventajas que proporcionan estos dispositivos son:

- Reducción de los picos de potencia en la red a pesar del aumento de la demanda [Gunselmann, 2005] [Foiadelli et al., 2006] [Iannuzzi, 2008].
- Estabilización de la tensión a pesar del perfil irregular de demanda [Sagareli and Gelman, 2004] [Rufer et al., 2004] [Hanmin et al., 2009] [Takagi, 2010] [Roasto et al., 2006].
- Incremento de la potencia máxima utilizable en sistemas de DC [Gunselmann, 2005].
- Reducción de la demanda de energía sin que se vean afectados el rendimiento de transporte ni la puntualidad [Siemens].

- La seguridad del sistema de suministro de corriente ferroviaria se mantiene, mejorando enormemente las prestaciones de la red durante el arranque de los vehículos [Siemens].

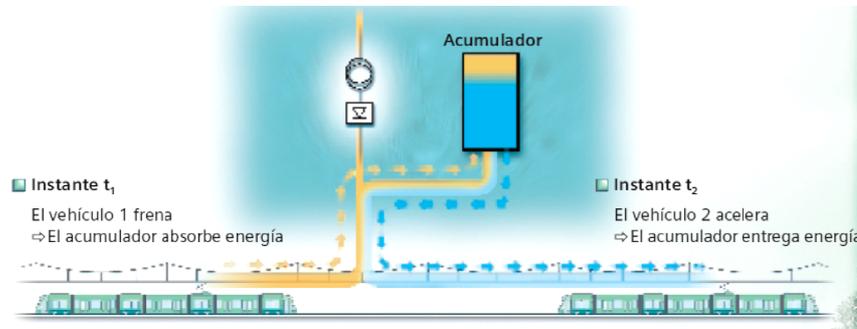


Figura 3.3: Esquema del funcionamiento de un sistema DC con una unidad de almacenamiento integrada. Fuente: [Gunselmann, 2005]

Actualmente existen dos formas de almacenamiento: acumuladores estáticos situados habitualmente en las subestaciones, y acumuladores embarcados en los trenes. Mientras que en el flujo de energía de los primeros intervienen todos los trenes en movimiento en el sector eléctrico en el que se encuentran, en los embarcados únicamente interviene el flujo del propio tren.

Un acumulador de energía instalado en una subestación DC tiene la capacidad de almacenar la energía sobrante de varios trenes regenerada en el freno, y que no puede ser aprovechada directamente por otros trenes en el instante de su generación. El acumulador podría posteriormente devolver la energía al sistema para alimentar a trenes que estén traccionando [Gunselmann, 2005] [Battistelli et al., 2009] [López López et al., 2011]. Este funcionamiento, ilustrado en la Figura 3.3, implica una transferencia de energía entre el tren y el acumulador, utilizando las líneas con las correspondientes pérdidas en la transmisión [M.Chymera et al., 2006].

La alternativa al almacenamiento en las subestaciones es la incorporación de acumuladores a bordo de los propios trenes. El acumulador se conecta directamente al inversor de corriente que alimenta a los motores, tal y como se indica la Figura 3.4. La inversión económica de esta forma es mayor puesto que son necesarios varios equipos para cada vehículo dependiendo de la capacidad de almacenaje deseada. No obstante este enfoque presenta otras ventajas como la posible operación de trenes sin catenaria en distancias cortas [Revista Actualidad Ferroviaria., 2010] [Meinert, 2009] [Kawasaki, 2008] [Steiner et al., 2007] [Destraz et al., 2007] o la reducción de los picos

de demanda, a la vez que se reducen las pérdidas del sistema por evitar las pérdidas en la transmisión de energía por la catenaria [Estévez, 2008] [Gunselmann, 2005]. En contrapartida, la masa total del tren se incrementa [Caputo, 2000], precisándose espacio adicional en los trenes [Steiner et al., 2007]. El desarrollo de acumuladores de energía está siendo muy estudiado en la actualidad; se encuentran numerosos estudios que tratan de buscar la mejor tecnología, configuración o tamaño de los dispositivos [Hase et al., 2002] [Sameshima et al., 2004] [Taguchi et al., 2007] [Ogasa, 2008] [Takahara et al., 2002] [Konishi et al., 2004] [Roasto et al., 2006] [Iannuzzi, 2008].

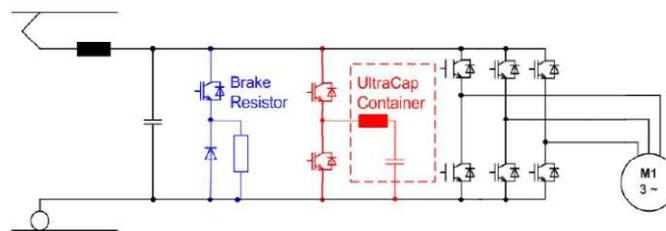


Figura 3.4: Convertidor de tracción con acumulador de energía. Fuente: [Steiner et al., 2007]

La Figura 3.5 muestra el ciclo de funcionamiento del acumulador embarcado en el tren durante el recorrido de varias interestaciones. Durante el frenado la energía cinética del tren se almacena en el acumulador. En el siguiente período de arranque y durante la tracción, el tren toma la potencia necesaria del acumulador en primer lugar y, en el caso de que no sea suficiente, de la red. Esto significa que existe al menos un ciclo de carga y descarga en cada interestación. Cuanto mayor sea la velocidad del tren al comienzo del frenado mayor será la energía regenerada, tal y como se deduce de la ecuación de la energía cinética (3.1). Por lo tanto, el control de carga y descarga del acumulador afecta a la energía consumida por el tren. Uno de los objetivos de este capítulo es saber cómo influye el acumulador embarcado en el diseño óptimo de las marchas ATO.

$$E = \frac{1}{2} M \cdot V^2 \quad (3.1)$$

Donde:

E es la energía cinética

M es la masa

V es la velocidad del tren



Figura 3.5: Perfil de velocidad y fuerza entre estaciones y ciclos de funcionamiento de los acumuladores

Para seleccionar el tipo adecuado de acumulador hay que tener en cuenta el tamaño, peso, eficiencia y ciclo de vida del dispositivo [Steiner and Scholten, 2004]. Las posibilidades son: baterías, volantes de inercia, condensadores de doble capa (también conocidos como supercondensadores¹), y almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES). Esta última opción la omitiremos por su baja utilización en sistemas ferroviarios a día de hoy.

Las baterías cuentan con un número de ciclos de carga muy limitado [Steiner and Scholten, 2004] [Steiner et al., 2007] [Sekijima et al., 2006], además de ser bastante pesadas. Ambas características hacen que no sean muy adecuadas para su utilización en trenes, no obstante se encuentran referencias en la literatura [Ogasa, 2008] [Kawasaki, 2008] [Sameshima et al., 2004].

Los volantes de inercia tienen dimensiones bastante desfavorables para su utilización, además de existir ciertas dudas acerca de su seguridad. La colocación de un volante de inercia encima de un vehículo en movimiento en el que viajan personas provoca reticencias a la hora de su implantación [Steiner and Scholten, 2004], siendo más adecuados para la acumulación en subestaciones [Richardson, 2002].

Los condensadores de doble capa presentan mayor capacidad de almacenamiento que otros condensadores tradicionales. Permiten formar acumuladores de dimensiones aceptables y además se adaptan bien a distintas tensiones. Destacan también su alto rendimiento, la capacidad de cambios de carga con dinámica elevada y la excelente aptitud para el trabajo cíclico [Gay and Ehsani, 2002] [Barrero et al., 2008]. A ello hay que añadir que están totalmente exentos de mantenimiento, y que su capacidad de acumulación de energía puede escalarse o

¹ También conocidos como “ultracapacitors” en inglés.

bien conectarse en cascada [Siemens]. De esta manera es posible adaptar el acumulador de energía de manera individualizada a las necesidades concretas de cada tren. Tienen también una alta densidad de potencia, aunque la densidad de energía es menor en comparación con las baterías [Agenjos et al., 2009] [Kadhim, 2009] [Barrero et al., 2010] [Konishi et al., 2010] [Barrero et al., 2008] [Ogasa, 2008] [Konishi et al., 2004] [Foiadelli et al., 2006] [Iannuzzi, 2008]. En consecuencia, es el sistema utilizado habitualmente para el almacenamiento de energía a bordo de tranvías y trenes ligeros (LRV), también sin catenaria [Miyatake et al., 2009] [Kawasaki, 2008], consiguiendo importantes ahorros [Destraz et al., 2007] [Steiner et al., 2007] [Miyatake and Matsuda, 2008] [Miyatake and Matsuda, 2009]. También se encuentran estudios acerca de sus beneficios en trenes diesel [Agenjos et al., 2009].

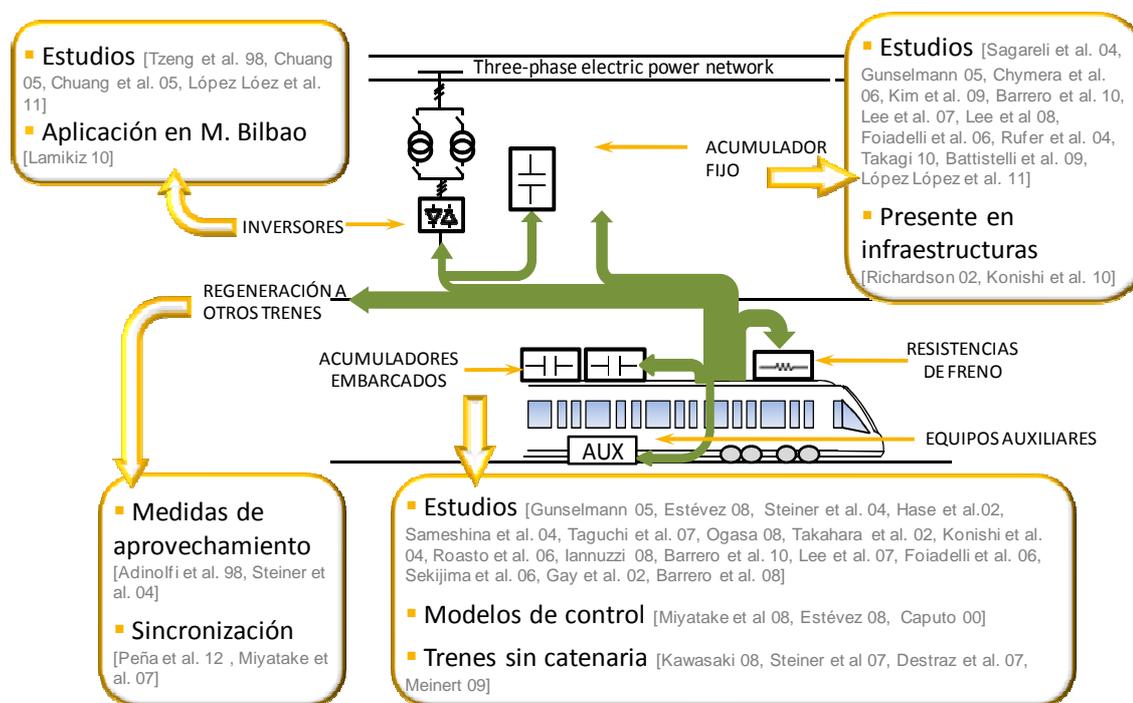


Figura 3.6: Estado del arte en los diferentes elementos de la red y material móvil que influyen en el aprovechamiento de la energía regenerada

Véase la Figura 3.6 como resumen de los estudios realizados sobre sistemas de acumulación, embarcada o fija, y devolución de energía a la red para su aprovechamiento por otros trenes o para inyección a la red de alta tensión.

3.1.3 La conducción y el freno regenerativo

El frenado regenerativo es un tema de actualidad, presente hoy en día en todos los foros de eficiencia energética en el ferrocarril. En los últimos tiempos empiezan a surgir voces que restan importancia a la conducción económica frente al aprovechamiento del freno eléctrico, argumentando que si es posible aprovechar esa energía no es preciso optimizar la energía consumida, ya que el exceso de consumo (frente a una conducción económica) se devolverá a la red mediante el frenado regenerativo. Este es un razonamiento demasiado simplista, que desprecia las pérdidas en la transmisión de la energía, en la cadena de tracción y en los acumuladores e inversores, sus limitaciones de potencia y la capacidad limitada de los acumuladores. Los autores de [Bocharnikov et al., 2010] consideran que la solución más eficiente es optimizar primero las marchas de cada tren y posteriormente incrementar la receptividad a la regeneración. Mientras, en [Noda and Koseki, 2009] se propone modificar las curvas de freno para obtener periodos de freno con pequeños cambios en el horario, aumentando la energía regenerada en un 22% que consideran, sería totalmente asumible por las subestaciones. En Metro de Bilbao, como se ha mencionado, ya se ha conseguido además compensación económica por la energía que se regenera y vierte a la red [Lamikiz, 2010]. Sin embargo, es difícil encontrar en la literatura algún estudio sobre la energía regenerada con medidas y datos reales, y mucho más en su relación con la conducción, que ayuden a posicionarse. Por lo general se suele considerar en los modelos de conducción que toda la energía regenerada se aprovecha [Xun et al., 2008, Khmel'nitsky, 2000, Bocharnikov et al., 2007], o por el contrario no se aprovecha nada [Bocharnikov et al., 2007, Khmel'nitsky, 2000]. En [Khmel'nitsky, 2000] también se considera un escenario con un aprovechamiento intermedio cuyo valor no se justifica.

Los autores de [Jong and Chang, 2005] aseguran que un modelo de estimación de consumo eléctrico de trenes, para que sea completo, debe considerar al menos tres aspectos: la energía de tracción, la energía de los equipos auxiliares y la energía producida por el freno regenerativo (3.2). Sin embargo, a la hora de proponer su caso de estudio, estos mismos autores utiliza trenes sin freno regenerativo.

$$E_{total} = E_{tracción} + E_{auxiliares} - E_{regeneración} \quad (3.2)$$

En [Miyatake and Ko, 2007] se considera al tren como almacenador de energía del tren que le sigue, por tanto, no busca una optimización de la conducción que aproveche la energía del freno, sino la separación óptima entre ambos. Los autores hablan de la conveniencia de sincronizar trenes para aprovechar la energía regenerada. Un estudio de este tipo se realizó también en [Ramos et al., 2008] [Peña-Alcaraz et al., 2012] con modelos realistas y pruebas en Metro de Madrid en horario comercial.

En [Açikbas and Söylemez, 2008], como ya se comentó anteriormente, se trata de optimizar la conducción mediante el estudio de los puntos de deriva. El simulador utilizado sí tiene en cuenta la energía regenerada entre trenes [Söylemez and Açikbas, 2004] en el cómputo total del consumo de la conducción. Caen en la cuenta de que la capacidad de ahorro es menor si existe regeneración entre trenes ya que la demanda de energía de la red se reduce. Sin embargo, añadiendo conducciones con derivas se producen menos periodos de freno y a partir de velocidades más bajas, por lo que se produce menos energía regenerada (3.1). Por otro lado, este tipo de estrategias se utilizan por lo general en horas valle, cuando la demanda de energía de la red es más baja, la receptividad de energía regenerada es menor y, si no hay dispositivos de almacenamiento, se pierde con mayor frecuencia. Por lo tanto concluyen que la interacción entre conducción económica (en este caso con derivas) y freno regenerativo es complicada de evaluar, y bien merece un estudio aparte que tenga en cuenta toda la casuística. Los autores de [Bocharnikov et al., 2010] también mencionan que las marchas óptimas son diferentes en horas valle y horas punta.

Precisamente esta posibilidad de distinguir el tipo de conducción entre hora valle o punta es uno de los objetivos que tratará de cubrir este capítulo. Se realizará un estudio sistemático de las ventajas energéticas de la conducción económica, del freno regenerativo, y de la combinación de ambas. Se plantearán diversos escenarios de forma que sea posible evaluar cuándo y de qué manera el tipo de estrategia de conducción óptima se puede ver modificado por la influencia del freno regenerativo, buscando siempre la eficiencia global del sistema. Además se realizará un análisis de sensibilidad de ahorro en el consumo neto en subestaciones en función de los distintos elementos implicados en la conducción, en la infraestructura y en la operación.

Como se ha visto es un tema novedoso del que se demandan conclusiones fiables. Para obtener resultados realistas se tendrán en cuenta todos los rendimientos de la cadena de tracción y el aprovechamiento real que una red de DC de metro puede hacer de la energía regenerada.

LITERATURA	Domínguez, M.
Toda la energía regenerada se aprovecha [Xun et al., 2008, Bocharnikov et al., 2007, Khmelnitsky, 2000]	Consumo en subestación Aprovechamiento según tecnología Conducción según escenario de tráfico (punta/valle) Criterios anteriores de diseño de marchas de regulación
Toda la energía regenerada se pierde [Khmelnitsky, 2000, Bocharnikov et al., 2007]	
Aprovechamiento intermedio [Khmelnitsky, 2000]	
Conducción + regeneración (escenarios concretos) [Bocharnikov et al., 2010, Açıkbaz and Söylemez, 2008, Söylemez and Açıkbaz, 2004]	
Conducción sin ATO con acumulador [Miyatake et al., 2009, Miyatake and Matsuda, 2009, Caputo, 2000, Steiner and Scholten, 2004, Sameshima et al., 2004, Ogasa, 2008, Takahara et al., 2002, Iannuzzi, 2008, Barrero et al., 2010, Lee et al., 2007, Foiadelli et al., 2006, Sekijima et al., 2006, Barrero et al., 2008]	
Cambios en el horario para aumentar regeneración [Bocharnikov et al., 2010, Noda and Koseki, 2009, Miyatake and Ko, 2007, Peña-Alcaraz et al., 2012]	

Tabla 3.1. Aportaciones de la tesis frente al estado del arte

3.1.4 Desarrollo del capítulo

En primer lugar se desarrollará un modelo de caracterización de la red y posteriormente de consumo neto del tren en subestación (en lugar del consumo en pantógrafo) considerando la energía regenerada. Después se reformulará y resolverá el problema de diseño óptimo de marchas ATO incluyendo la regeneración de energía, y se presentará el caso estudio con los escenarios de tráfico y dispositivos de aprovechamiento considerados. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos, tanto desde el punto de vista del diseño óptimo de marchas como de la eficacia de las distintas estrategias de aprovechamiento del frenado regenerativo.

3.2 El modelo de red

Se definirá en esta sección el modelo de la red de tracción caracterizada por medio de dos coeficientes: el *coeficiente de recuperación* y el *coeficiente de pérdidas* y que constituyen una de las aportaciones de la tesis. Ambos se obtienen a partir del cálculo de la energía consumida en subestaciones de todos los trenes circulando en la línea en diferentes escenarios. Dichos escenarios representan una configuración particular de la red eléctrica, así como un determinado tráfico en un periodo de tiempo. Véase la Figura 3.7 para seguir la notación.

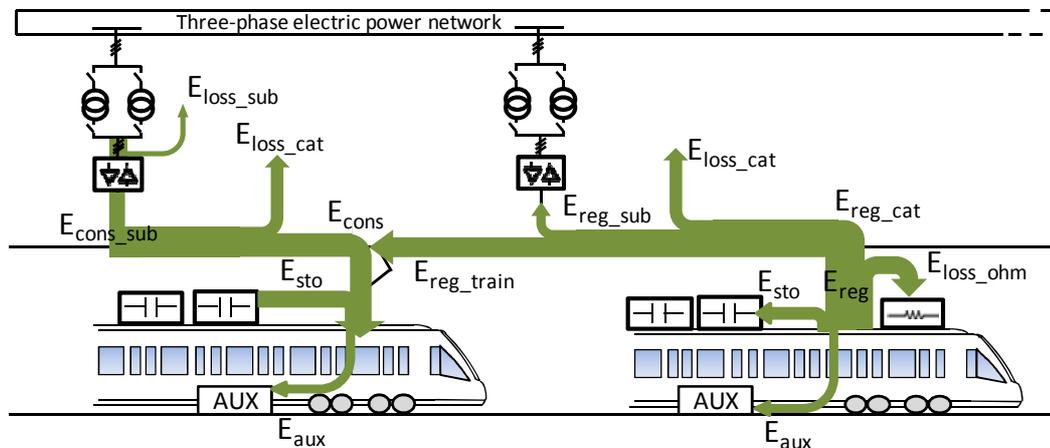


Figura 3.7: Flujos de energía en la red

La energía producida por el frenado regenerativo y no utilizada por los sistemas auxiliares del tren (E_{aux}), o el posible acumulador embarcado (E_{sto}), es la energía regenerada disponible para su aprovechamiento (E_{reg}). Dependiendo de la receptividad de la red parte de esa energía podrá ir a catenaria (E_{reg_cat}), mientras que el resto será quemada en bancos de resistencias a bordo del tren (E_{loss_ohm}). Estas resistencias son necesarias para evitar incrementos de tensión por encima del máximo valor permitido (aproximadamente un 18% del valor nominal). La energía E_{reg_cat} puede ser utilizada por otros trenes (E_{reg_train}), o enviada a subestaciones reversibles (E_{reg_sub}).

Un tren demandando energía puede ser alimentado por las subestaciones (E_{cons_sub}), por la energía que otros trenes (E_{reg_train}) han regenerado, por su acumulador (E_{sto}) en el caso de que disponga de uno embarcado, o por una combinación de las tres opciones.

3.2.1 Coeficiente de recuperación de energía RC_s

La cantidad de energía que las subestaciones deben suministrar puede verse disminuida gracias a la energía regenerada. En todo caso, la energía regenerada inicialmente producida es mayor que la disponible para ser utilizada por otro tren o dispositivo de acumulación puesto que diferentes pérdidas y rendimientos entran en juego en los motores, en los convertidores de potencia y en el transporte de energía.

Por tanto es necesario un coeficiente que caracterice el uso total de la energía regenerada en la red de manera que sea posible comparar diferentes escenarios. El coeficiente modelado se denomina *coeficiente de recuperación* (RC_s), y se define en (3.3). El RC_s cuantifica los ahorros de energía medidos en subestaciones en un determinado escenario s (en el cual existe alguna posibilidad de recuperación de energía), frente a la energía regenerada por todos los trenes y que se encuentra disponible para ser inyectada en la red ($\sum_t E_{reg}^t$)

$$RC_s = \frac{\sum_t E_{cons_sub,b}^t - (\sum_t E_{cons_sub}^t - \sum_t E_{reg_sub}^t)}{\sum_t E_{reg}^t} \quad \forall t \quad (3.3)$$

Donde:

$\sum_t E_{cons_sub,b}^t$ es la energía consumida de subestación por todos los trenes en el caso base

$\sum_t E_{cons_sub}^t$ es la energía neta consumida en subestación por todos los trenes en el escenario

$\sum_t E_{reg_sub}^t$ es la energía regenerada por todos los trenes y aprovechada en la subestación cuando ésta es reversible

$\sum_t E_{reg}^t$ es la energía total regenerada por todos los trenes y disponible para su utilización en la red

La energía neta consumida en subestaciones se calcula como la energía proporcionada por las subestaciones ($\sum_t E_{cons_sub}^t$) en el escenario considerado, menos la energía que se ha podido llevar a la red de AC a través de inversores de potencia si la subestación dispusiera de ellos ($\sum_t E_{reg_sub}^t$). Los ahorros se calculan respecto a un

caso base con una red no receptiva ($\sum_t E_{cons_sub,b}^t$). Si un tren t está frenando en el caso base, la energía regenerada solamente se podrá utilizar para alimentar los sistemas auxiliares del tren (y el acumulador de energía embarcado si existiera). El resto de la energía tendría que ser quemada en resistencias. Si por el contrario el tren no estuviera frenado, tanto la energía de tracción como la de los sistemas auxiliares sería proporcionada por la red de potencia o por el acumulador embarcado en el tren.

Este coeficiente depende del escenario y, en consecuencia, de la configuración de red considerada y la frecuencia de trenes. Es importante distinguirlo del *coeficiente de receptividad* (“receptivity rate”) calculado en [Açikbas and Söylemez, 2007], y que es la energía regenerada utilizada de toda la disponible en catenaria, sin considerar ni su posible uso posterior, ni las pérdidas, ni su impacto en reducción del consumo neto de las subestaciones. El RC_s que aquí se propone considera la reducción de energía consumida en subestaciones gracias a la energía regenerada.

3.2.2 Coeficiente de pérdidas de energía ELC_s

Se ha desarrollado otro coeficiente para modelar la red: el *coeficiente de pérdidas de energía* (ELC_s), que se define en (3.4). Este coeficiente caracteriza la energía perdida en su transporte hasta el tren y en la propias subestaciones, considerando la demanda total de energía en pantógrafo ($\sum_t E_{cons}^t$) respecto a la energía que proporcionan las subestaciones en el caso base ($\sum_t E_{cons_sub,b}^t$).

$$ELC_s = \frac{\sum_t E_{cons}^t}{\sum_t E_{cons_sub,b}^t} \quad \forall t \quad (3.4)$$

Donde:

$\sum_t E_{cons}^t$ es la demanda de energía de todos los trenes en pantógrafo

Los coeficientes RC_s y ELC_s se calculan simulando el tráfico de trenes en una línea durante un periodo de tiempo teniendo en cuenta la red de potencia en diferentes escenarios. Para su obtención en los casos de estudio que se presentarán

posteriormente se ha utilizado un simulador de la red eléctrica [López López et al., 2011].

3.2.3 Energía consumida por un tren en subestaciones ECS_s^t

A partir de la energía de tracción demandada por un tren t (E_{cons}^t), y de la disponible que ha regenerado (E_{reg}^t) en cada interestación en un escenario s , es posible hallar una estimación del consumo de ese tren en subestaciones (ECS_s^t). Basta con tener en cuenta la recuperación de energía regenerada por medio de los coeficientes definidos anteriormente (3.5). El primer término de la ecuación calcula la energía consumida en subestaciones, asumiendo una receptividad nula de la energía regenerada. El segundo término disminuye este consumo con la energía regenerada que realmente se ha aprovechado en las subestaciones reduciendo el consumo neto.

$$ECS_s^t = \frac{E_{cons}^t}{ELC_s} - E_{reg}^t \cdot RC_s \quad (3.5)$$

De esta manera la red se considera aparte, y se caracteriza y modela por estos coeficientes en cada escenario. Como resultado, el cálculo de la ECS_s^t de cada tren en cada interestación no se corresponde con una situación de tráfico concreta sino con una contribución media del tren al consumo en subestaciones. Así es posible incluir la evaluación de la energía regenerada en el proceso de diseño de las marchas ATO, descrito en el anterior capítulo así como los ahorros esperables en subestación y no solo en pantógrafo. Como resultado, utilizando esta nueva función de coste se pueden analizar los posibles cambios en el conjunto de marchas óptimas de distintos escenarios gracias a la energía regenerada.

En [Miyatake and Matsuda, 2008] se estudian los ahorros en subestación con acumuladores de energía a bordo de los trenes en condiciones de regeneración normales y “débiles”. Se considera únicamente un tren alimentado por dos subestaciones. El ECS_s^t que aquí se presenta también se calcula para un tren, pero en una situación real de volumen de tráfico ya que los coeficientes RC_s y ELC_s tienen en cuenta el sistema completo de tráfico y subestaciones como ya se ha mostrado. La energía regenerada por otros trenes se tiene también en cuenta.

3.3 Energía consumida por el tren en pantógrafo

Para calcular la energía demandada por un tren t medida en pantógrafo (E_{cons}^t), y la energía regenerada por el mismo tren y disponible (E_{reg}^t), se ha utilizado el simulador descrito en el capítulo anterior (ver apartado 2.2) considerando además un acumulador embarcado y el consumo de los sistemas auxiliares. Este simulador puede obtener el consumo en pantógrafo (positivo o negativo) de cada marcha de ATO, comprobando si cumple las restricciones operativas y de confort.

3.3.1 Consumo de los sistemas auxiliares

Un tema importante que no se tiene en cuenta normalmente es el consumo de los sistemas auxiliares [Steiner and Scholten, 2004], y que sin embargo tienen un impacto significativo en los ahorros que se pueden conseguir con la energía regenerada. Estos sistemas son la iluminación, el sistema de comunicaciones, el aire acondicionado, etc. Suponen un consumo adicional al de tracción cuando el tren está traccionando mientras que pueden ser alimentados por la energía regenerada por el tren cuando está frenando. Este consumo puede variar en función de la estación, la masa transportada, etc. Sin embargo, es común modelarlo como un valor medio constante: sobre un 8% de la energía de tracción consumida en tranvías [Destraz et al., 2007], y entre un 10% [Hanmin et al., 2009] [Kim and Lee, 2009] y un 15% [Lamikiz, 2010] en trenes metropolitanos. Precisamente este último ha sido el valor considerado en esta tesis para el caso estudio que se presentará más adelante.

3.3.2 Consideración de un acumulador de energía a bordo de los trenes

Instalando un acumulador de energía embarcado en los trenes, estos podrían acumular su propia energía regenerada mientras frenan y utilizarla durante el siguiente arranque, lo que modificaría el flujo de energía en el tren (Figura 3.7). Los autores de [Miyatake and Matsuda, 2009] sugieren que la optimización de la marcha y la orden de carga y descarga del acumulador deberían hacerse de forma conjunta. Sin embargo, después de llevar a cabo la optimización concluyen que el perfil de velocidad apenas cambia con o sin acumulador de energía siendo la consigna para el acumulador de carga cuando el tren frena, y de descarga cuando tracciona. Con el objetivo de desarrollar un estudio realista, en esta tesis se considerará que la carga y descarga del acumulador únicamente depende del perfil de demanda de potencia y su

correspondiente perfil de velocidad. Es decir, cuando el tren está frenando el acumulador se carga, (si no se encuentra lleno ya), con la energía regenerada no utilizada por los sistemas auxiliares (ver la caja *charging energy storage* en la Figura 3.8.). Por el contrario, cuando el tren está traccionando es alimentado en primer lugar por el acumulador embarcado si está cargado (ver la caja *discharging energy storage* en la Figura 3.8) como ya se mostró en [Destraz et al., 2007, Caputo, 2000] [Chymera et al., 2008] [Barrero et al., 2008]. El tren también es alimentado desde la catenaria si la energía suministrada por el acumulador no es suficiente. El modelo de consumo de energía para calcular la energía consumida y la regeneración en pantógrafo se describe en la Figura 3.8 (en la que se considera que nunca se supera la potencia máxima del acumulador).

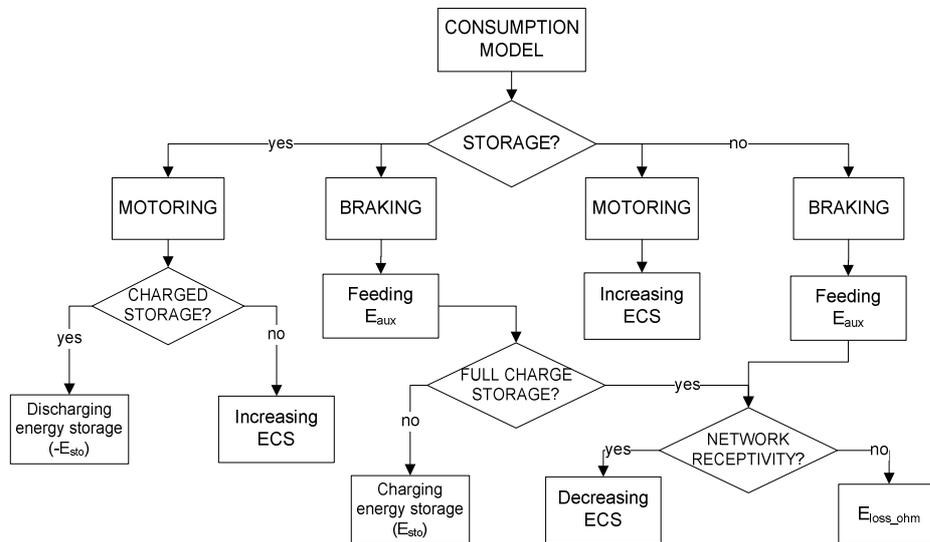


Figura 3.8: Diagrama de flujo del modelo de consumo

El acumulador que se ha considerado está formado por supercondensadores conectados en dos bancos en paralelo. La energía máxima acumulada por cada dispositivo es W_M cuando la tensión es máxima U_M (3.6). Sin embargo al estar la tensión mínima limitada a U_m la energía total que se puede acumular es W_u (3.7).

El rendimiento de los supercondensadores (η_c) depende de la corriente de descarga (I) y la tensión, tal y como muestra la ecuación (3.8). Se obtienen rendimientos más altos para bajos ratios de corriente de carga y descarga [Kadhim, 2009].

$$W_M = \frac{1}{2} C \cdot U_M^2 \quad (3.6)$$

$$W_u = \frac{1}{2} C \cdot (U_M^2 - U_m^2) \quad (3.7)$$

$$\eta_c = 1 - \frac{W_R}{W_U} = 1 - \frac{R \cdot C \cdot U_M \cdot I \cdot (100 - d) / 100}{W_U} \quad (3.8)$$

Donde:

R es la resistencia de los ultracondensadores

$d = (U_m / U_M) \cdot 100$ es el *ratio de tensión de descarga* (voltage discharge ratio) [Barrade and Rufer, 2003]

C es la capacidad de los ultracondensadores

El modelo del circuito del tren con un acumulador embarcado se muestra en la Figura 3.9.

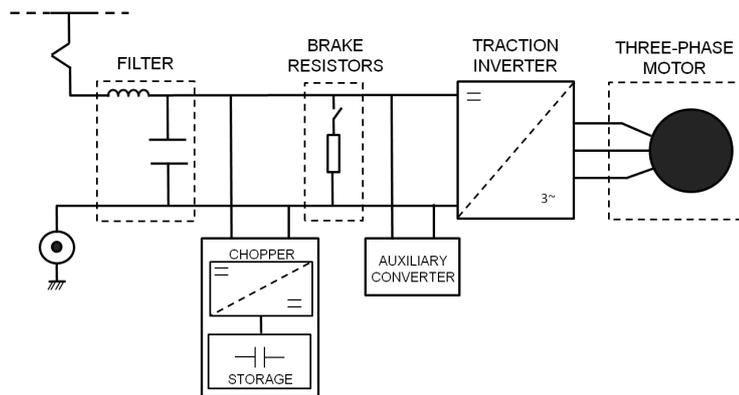


Figura 3.9: Modelo del circuito del tren con un acumulador de energía embarcado

3.4 Diseño de marchas

Una vez que se ha caracterizado el uso medio de la energía regenerada en diferentes escenarios por medio de los coeficientes RC_s y ELC_s , es posible realizar el diseño de marchas teniendo en cuenta la energía regenerada en el cómputo total del consumo, El objetivo, al igual que en el capítulo anterior, es encontrar el conjunto óptimo de marchas por interestación a programar en el sistema de regulación de tráfico, pero además en este caso diferenciando según escenarios de infraestructura y tráfico caracterizados por estos dos coeficientes. Para las nociones básicas del diseño de marchas, consúltese el capítulo anterior en el apartado 2.4.

La función de coste que hasta ahora se consideraba energía en pantógrafo, se modifica ahora incluyendo los coeficientes RC_s y ELC_s para tener en cuenta la energía regenerada, y obtener como nueva función de coste la energía neta en subestación (ECS_s^t calculado según la ecuación (3.5)). Esto modifica la curva de Pareto en el diseño óptimo de marchas. Véase un ejemplo en la Figura 3.12.

3.5 Caso ejemplo

El caso ejemplo es el ya mostrado en el capítulo anterior (ver apartado 2.3.1): la Línea 3 de Metro de Madrid. Para este nuevo análisis se ha considerado un intervalo entre trenes de 2min en hora punta y de 15min en hora valle. Es importante añadir que las subestaciones están interconectadas en esta línea, lo que ya de por sí mejora la transferencia de energía entre trenes.

Se ha modelado un acumulador de energía similar al “MITRAC Energy Saver” de Bombardier [Steiner and Scholten, 2004] [Steiner and Scholten, 2005]. MITRAC lleva funcionando desde septiembre de 2003 en un LRV de Mannheim (Alemania), y además se han realizado simulaciones con él en un sistema metropolitano europeo [Steiner et al., 2007]. Para el caso ejemplo planteado, se considera que el acumulador tiene una capacidad total de $C=2 \times 18.75F$, y una energía máxima acumulable de $W_M=1.296kWh$ por cada dispositivo. Con $U_M=500V$ y $U_m=250V$ ($d=50\%$, [Douglas and Pillay, 2005] [Barrero et al., 2008]) la energía acumulable total es de $W_u=0.972kWh$ (3.7).

La unidad de tren considerada está formada por cuatro coches motores de 321kW cada uno y dos remolques. Hay dos bogies motorizados por cada coche motor y dos motores por cada bogie, lo que hace que haya en total 16 motores de 80.25kW cada uno. Asumiendo 800A [Rufer, 2010] como la máxima corriente del acumulador, éste puede proporcionar 400kW de potencia máxima, suficiente para alimentar al equipo de tracción de un coche motor y a los sistemas auxiliares. Por lo tanto, se suponen 4 dispositivos, uno por cada coche motor, con una masa total de $M=4 \times 477=1908kg$.

El rendimiento de los supercondensadores se considera no constante, variando entre el 75% y el 97% de acuerdo a la ecuación (3.8). El rendimiento del convertidor bidireccional (“chopper” en la Figura 3.9) se asume constante e igual a 95% [Miyatake and Matsuda, 2009, Morita et al., 2008].

3.5.1 La masa que añade el acumulador de energía

Normalmente la masa adicional que suponen los acumuladores de energía embarcados en los trenes se considera una desventaja a la hora de plantearse su utilización [Steiner et al., 2007] [Caputo, 2000], aunque en [Barrero et al., 2008] se asegura que para un mismo tipo de acumulador los ahorros aumentan con el peso del tren. Es por esto que a continuación se estudian las consecuencias de añadir esa masa extra al tren antes de realizar el diseño de marchas. Se han realizado simulaciones en una línea de Metro de Madrid para ver el compromiso entre la incorporación de más masa al tren y los ahorros esperables utilizando los acumuladores [Domínguez et al., 2011].

Si el incremento de masa es un impedimento para obtener importantes ahorros, bajo las mismas condiciones y no siendo posible devolver la energía regenerada a la catenaria, un tren que transporta un acumulador inicialmente descargado consumiría más que un tren sin él. Sin embargo se han obtenido resultados en los que algunos trenes tienen menores consumos con el acumulador inicialmente descargado [Domínguez et al., 2011].

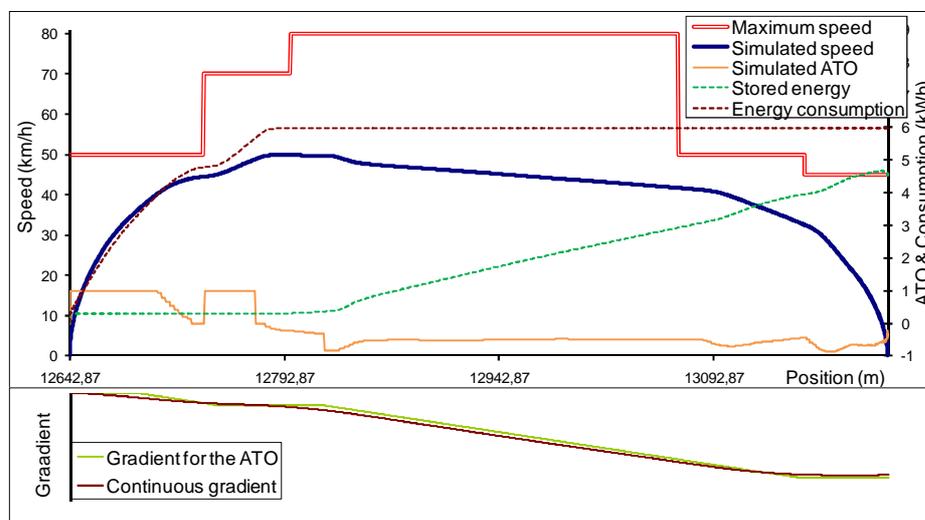


Figura 3.10: Perfil de velocidad y energía consumida y acumulada en el recorrido de Callao 1 situada en una pendiente casi constante

Por ejemplo, la interestación de Callao 1 situada en pendiente tiene únicamente un periodo de tracción para arrancar el tren (Figura 3.10). Ese es el periodo en el que no hay carga en el acumulador. Tras este periodo el tren únicamente frena y el acumulador por tanto se carga, pero esta energía no será utilizada hasta la siguiente

interestación. En consecuencia, y como era de esperar, la energía consumida en la interestación es mayor (5.99%) con el acumulador que sin él, debido a la masa adicional transportada.

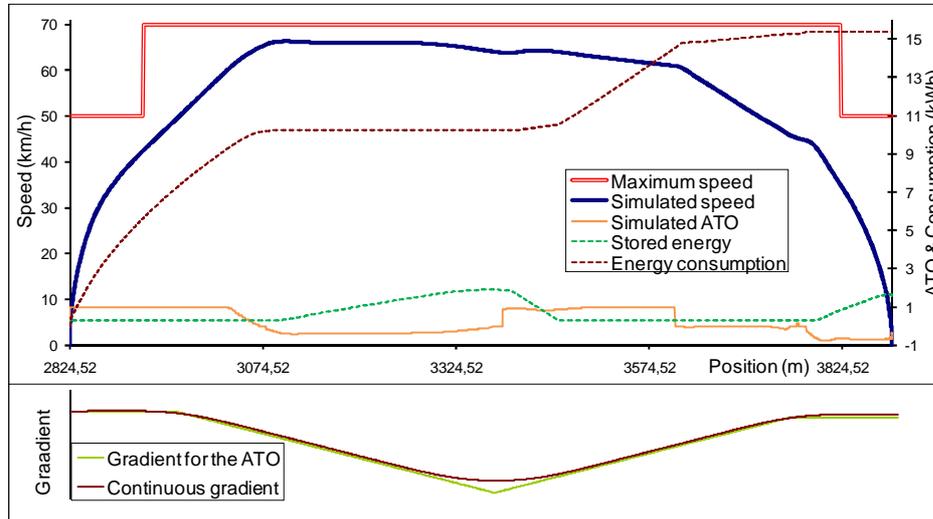


Figura 3.11: Perfil de velocidad, del terreno, energía consumida y acumulada en la interestación de San Cristobal 1

Sin embargo, el tren atraviesa diferentes pendientes y rampas en el recorrido de otras estaciones con diferentes periodos de tracción y freno. Por lo tanto puede ser alimentado por el acumulador embarcado tras el primer periodo de freno (Figura 3.11). En ese caso la simulación de la energía total consumida en la interestación es menor (6.12%) que si no se tuviera en cuenta el acumulador.

De estos resultados se concluye la necesidad de realizar el análisis global de la línea y no en cada interestación por separado, puesto que la carga del acumulador en cada interestación depende del uso de la energía en la interestación anterior.

3.5.2 Cálculo de la carga inicial

A la hora de diseñar el conjunto de marchas es muy importante utilizar un valor realista de carga inicial del acumulador embarcado. Con este fin se han realizado simulaciones de la línea con 8 valores diferentes de carga inicial. Los resultados muestran que la carga disponible en el acumulador tras el recorrido de cada interestación es básicamente la misma. Es decir, el estado final de carga es independiente de la carga

inicial, ya que ésta es consumida completamente al arrancar el tren. Se puede ver un ejemplo de una interestación en la Tabla 3.2.

Running Time	Traction Energy	Braking Energy	Energy Consumption	Mechanical Work	Initial charge of the storage device	Final charge of the storage device	Stored Energy	Wasted Energy
(s)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(%)	(%)	(kWh)	(kWh)
98.5	12.79	3.62	16.44	9.72	-	-	-	1.80
98.7	12.91	3.69	15.31	9.84	25%	34.45%	2.03	0.00
98.7	12.91	3.69	14.79	9.84	35%	34.47%	2.03	0.00
98.7	12.91	3.69	14.27	9.84	45%	34.46%	2.02	0.00
98.7	12.91	3.69	13.75	9.84	55%	34.44%	2.02	0.00
98.7	12.91	3.69	13.23	9.84	65%	34.45%	2.02	0.00
98.7	12.91	3.69	12.71	9.84	75%	34.45%	2.02	0.00
98.7	12.91	3.69	12.20	9.84	85%	34.46%	2.03	0.00
98.7	12.91	3.69	11.73	9.84	95%	34.44%	1.97	0.00

Tabla 3.2: Carga final del acumulador para distintos valores de carga inicial en el recorrido de Almedrales 1

Departure station	Initial charge	Departure station	Initial charge
VA1	100.00%	M2	82.66%
SC1	68.46%	AR2	39.01%
VC1	49.27%	VR2	87.82%
CI1	48.92%	PE2	65.96%
SF1	89.57%	C2	34.57%
DO1	46.64%	S2	83.55%
AL1	34.82%	LV2	87.43%
L1	34.47%	EM2	57.18%
DL1	42.92%	PF2	44.21%
PF1	31.71%	DL2	56.03%
E1	31.06%	L2	87.42%
LV1	29.45%	AL2	33.83%
S1	43.87%	DO2	45.03%
C1	42.44%	SF2	66.19%
PE1	87.58%	CL2	46.93%
VR1	42.44%	VC2	49.12%
AR1	43.82%	SC2	51.17%
M1	82.66%	VA2	34.98%

Tabla 3.3: Carga inicial del acumulador a la salida de cada interestación con marcha tendida

Sin olvidar este resultado, y sabiendo que la energía que se regenera y se puede almacenar en el acumulador es diferente en función del perfil del terreno, la marcha y la velocidad máxima de la vía, el siguiente paso ha sido simular la línea entera para obtener un valor realista de carga inicial por cada interestación. Este valor es importante puesto que depende del frenado en la interestación anterior como veíamos antes. La Tabla 3.3 muestra los resultados para marcha tendida. Se ha seguido el mismo procedimiento para la marcha nominal. Estos valores de carga inicial son

necesarios para el diseño de las marchas ATO en aquellos escenarios que consideren acumuladores de energía embarcados en los trenes.

3.5.3 Escenarios

Los escenarios definidos se han simulado considerando el recorrido de ida y vuelta de la línea con una carga de pasajeros del 30% de la carga máxima. Se muestran en la Tabla 3.4 junto con sus valores correspondientes de RC_s y ELC_s , expresados en %. Los valores elevados del ELC_s acompañados de su nombre “coeficiente de pérdidas” pueden llevar a entender que existen pérdidas en la línea de más del 98%. Léase sin embargo este coeficiente como la energía que realmente se consume tras las pérdidas, no como el porcentaje de pérdidas en catenaria.

En los escenarios 1 y 7 toda la energía regenerada disponible después de alimentar a los sistemas auxiliares es quemada en los bancos de resistencias. A partir de ellos se definen 5 escenarios más en los que se combinan transferencia de energía entre trenes, inversores de potencia en subestaciones y acumuladores embarcados en los trenes.

	SCENARIO	Regenerative energy used by other trains	Inverting substations	On board energy storage device	Recovery coefficient RC (%)	Energy losses coefficient ELC (%)
OFF-PEAK HOURS	1				0	98.86
	2	X			69.83	98.86
	3	X	X		96.74	98.86
	4			X	0	98.89
	5	X		X	71.46	98.89
	6	X	X	X	99.48	98.89
PEAK HOURS	7				0	98.15
	8	X			100.86	98.15
	9	X	X		100.86	98.15
	10			X	0	98.2
	11	X		X	101.07	98.2
	12	X	X	X	101.07	98.2

Tabla 3.4: Escenarios definidos y correspondientes valores de RC_s y ELC_s

Pueden llamar la atención los valores de RC_s (expresados como %) mayores del 100%. Estos resultados indican que toda la energía regenerada durante el frenado eléctrico es utilizada por otros trenes (no se quema nada en resistencias), y las pérdidas son menores que si esos mismos trenes fueran alimentados por subestaciones (caso base del cálculo de RC_s).

En hora punta la transferencia de energía entre trenes es suficiente para aprovechar toda la energía regenerada en catenaria y por eso los escenarios 8 y 9 tienen los mismos valores de RC_s y de ELC_s . El escenario 9 añade subestaciones reversibles pero no sobra energía regenerada que llegue hasta ellas.

3.6 Resultados

3.6.1 El conjunto de marchas diseñadas

En la Figura 3.12 se comparan el espacio de soluciones de los escenarios 1, 2 (hora valle) y 8 (hora punta). La curva de Pareto del escenario 1 no tiene en cuenta la energía regenerada, es decir, sería equivalente a las curvas de Pareto halladas en el capítulo anterior (con energías medias ahora en subestaciones). En los escenarios 2 y 8 el tren puede ser alimentado por la energía regenerada por otros trenes, de esta manera el ECS_s^t disminuye respecto al escenario 1. En consecuencia, las curvas de Pareto con las marchas óptimas de la interestación se desplazan en sentido decreciente, en el eje Y (ECS_s^t). Cuanto mayor sea el RC_s mayor es este desplazamiento de la curva de Pareto.

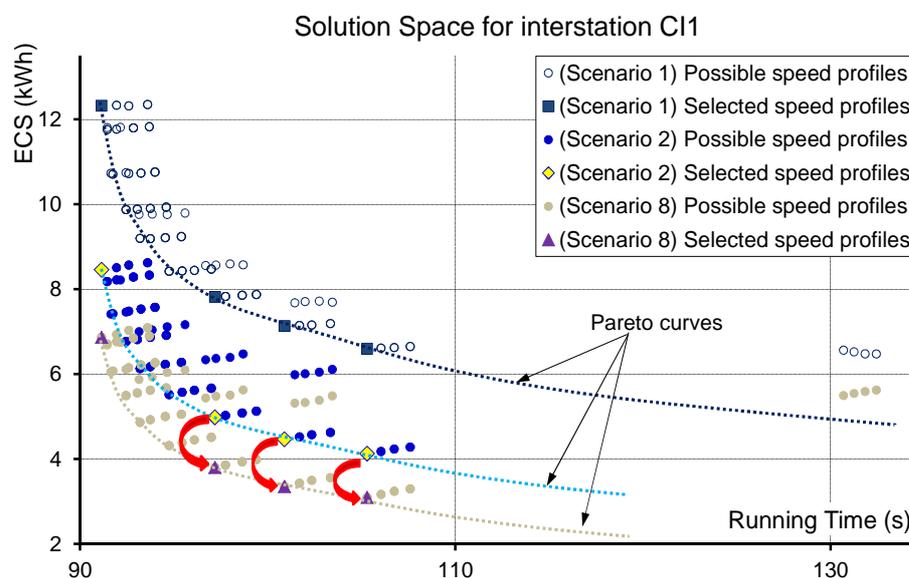


Figura 3.12: Escenarios 1, 2 (hora valle) y 8 (hora punta)

Comparando las curvas de Pareto de los escenarios 2 (hora valle) y 8 (hora punta) con receptividad a la energía regenerada (Figura 3.12), es posible ver que el diseño óptimo de marchas es el mismo en ambos escenarios. Según este resultado no sería necesario programar un conjunto de marchas diferente en el sistema de regulación de tráfico en función de la hora del día (escenario de tráfico).

Comparando los diferentes escenarios de receptividad a la energía regenerada se observan diferentes marchas sobre la curva de Pareto. Se muestra un ejemplo en la Figura 3.13 con el espacio de soluciones para la interestación de Delicias 2 en los escenarios 7 y 8-9 (hora punta). Los escenarios 8 y 9 se consideran juntos puesto que tienen el mismo valor de RC_s y ELC_s (Tabla 3.4). Algunas marchas situadas sobre la curva de Pareto en el escenario 7 sin embargo no son óptimas en los escenarios 8 y 9. Por lo tanto es necesario un nuevo diseño de marchas.

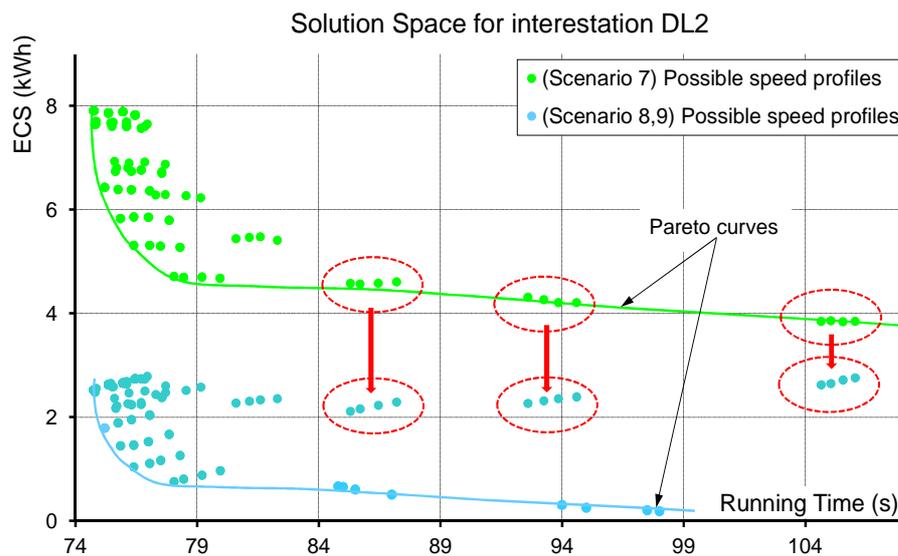


Figura 3.13: Espacio de soluciones de Delicias 2 en los escenarios 7 y 8

Por el contrario, en los escenarios que consideran acumuladores embarcados en los trenes (4, 5, 6, 10, 11 y 12), el conjunto de marchas óptimas por interestación es el mismo que en los escenarios sin receptividad (escenarios 1 y 7). La razón es que la energía regenerada disponible se almacena en los acumuladores embarcados quedando poca energía disponible para ser devuelta a catenaria. En conclusión, hay un conjunto de marchas óptimas por cada interestación en escenarios en los cuales la energía regenerada apenas se devuelve a la red (escenarios 1, 4, 5, 6, 7, 10, 11 y 12),

y otro diferente en los escenarios con suficiente energía regenerada inyectada de nuevo a la catenaria (escenarios 2, 3, 8 y 9).

Por lo tanto, el diseño óptimo de marchas que se obtuvo en el capítulo anterior minimizando la energía de tracción en pantógrafo, es decir, el equivalente al escenario 1 o 7, es también válido para escenarios con acumuladores embarcados. Un resultado similar se puede ver en [Miyatake and Matsuda, 2009]. Asimismo, como ya se mostró anteriormente, tampoco varía la carga inicial de energía de los acumuladores.

3.6.2 Ahorros potenciales

La Figura 3.14 y Figura 3.15 muestran el consumo neto en subestaciones ECS_s^t tras una vuelta completa a la línea en cada escenario. Se muestran tanto los resultados para marcha tendida, como para la marcha nominal (marcha 1), que se ha diseñado aplicando las técnicas de conducción económica. De esta manera es posible analizar no sólo los ahorros debidos a inversiones, como por ejemplo la instalación de subestaciones reversibles o acumuladores de energía embarcados, sino también los ahorros atribuibles a una conducción económica para cada escenario.

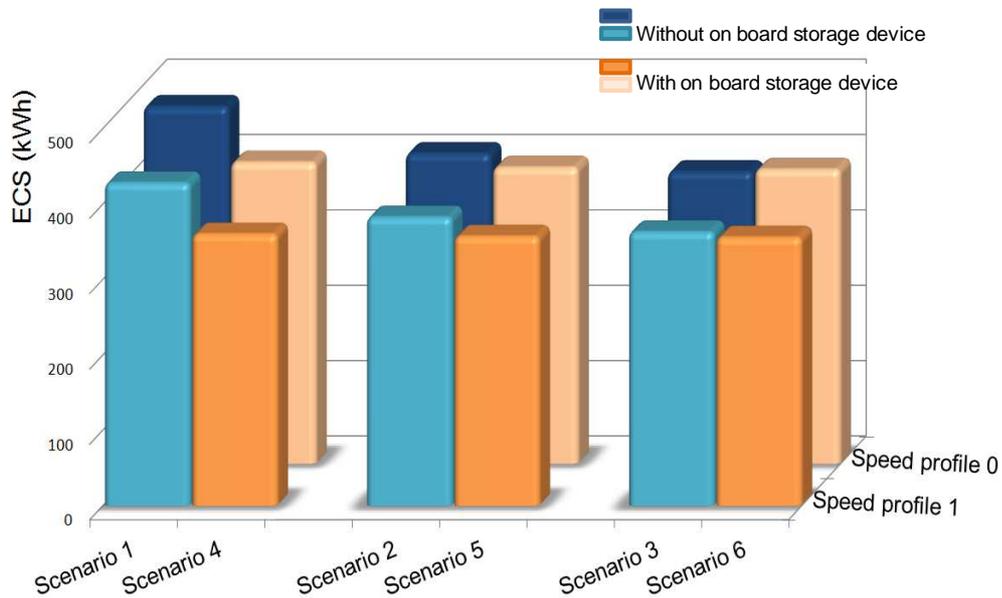


Figura 3.14: Energía consumida en subestaciones en horas valle

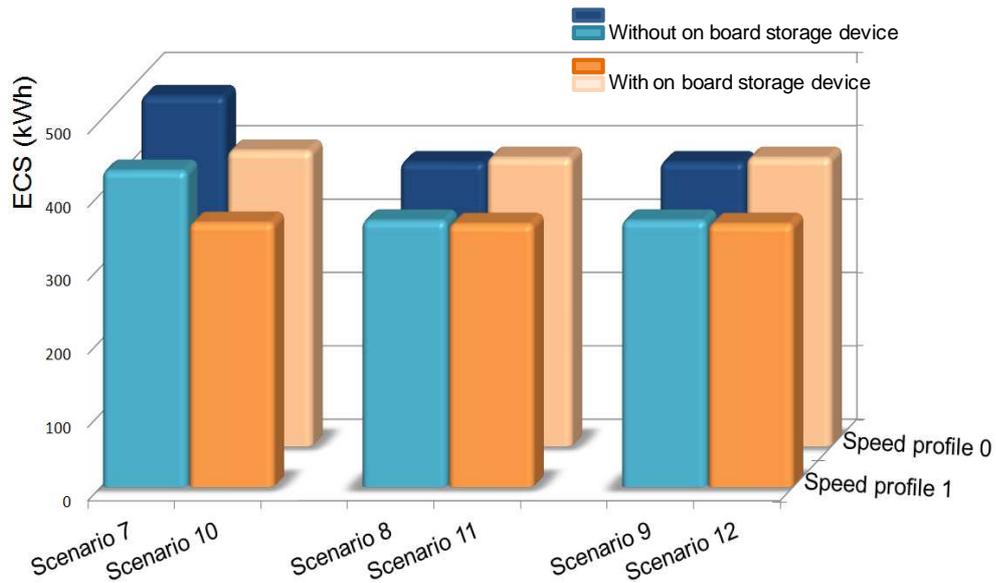


Figura 3.15: Energía consumida en subestaciones en horas punta

3.6.2.1 Ahorros asociados a la conducción económica (ecodriving)

En el escenario del peor caso (escenario 1 ó 7), en el cual no es posible aprovechar nada de la energía regenerada, se puede llegar a ahorrar hasta un 9.68% únicamente utilizando la marcha nominal en lugar de la tendida. Se observan los mismos resultados para hora valle y punta ya que el RC_s es 0 en ambos casos y el ELC_s es muy parecido (Tabla 3.5). Partiendo de la Figura 3.14 y Figura 3.15 se particularizan estos resultados en la Figura 3.16.

OFF-PEAK HOURS		PEAK HOURS	
Savings with eco-driving			
Scenario 1	9.68%	Scenario 7	9.68%
Scenario 2	7.01%	Scenario 8	6.19%
Scenario 3	6.27%	Scenario 9	6.19%
Scenario 4	9.98%	Scenario 10	10.62%
Scenario 5	9.18%	Scenario 11	8.85%
Scenario 6	8.86%	Scenario 12	8.85%

Tabla 3.5: Ahorros que se pueden obtener introduciendo conducción económica

En vista de lo anterior se puede reducir el consumo neto en subestaciones ECS_s^t significativamente con un diseño óptimo de las marchas sin necesidad de invertir en nuevos equipamientos, tal y como se describe en [Bocharnikov et al., 2010]. Incluso en escenarios con receptividad o acumuladores embarcados se pueden obtener

importantes ahorros adicionales introduciendo conducción económica. Por ejemplo, en el escenario 4 o 10, en los que la energía regenerada se reutiliza en los acumuladores se puede añadir un 9÷11% de ahorro si se utiliza la marcha nominal en lugar de la tendida; esto supone únicamente un máximo de 5s más de recorrido entre estaciones, que se reservan para recuperar retrasos. En conclusión, siempre es eficiente ahorrar energía por medio de conducciones económicas, y sus ahorros no se compensan al considerar el aprovechamiento de la energía regenerada en los frenados por el sobreconsumo asociado una conducción no económica, debido principalmente a los rendimientos implicados en las secuencias de tracción y freno.

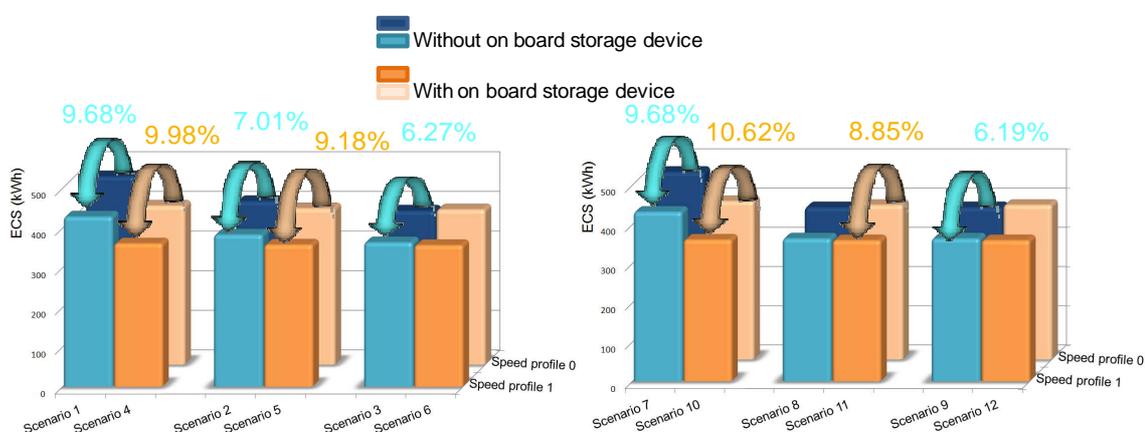


Figura 3.16: Ahorros que se pueden obtener introduciendo conducción económica en hora valle (izquierda) y punta (derecha)

3.6.2.2 Ahorros gracias a inversiones en la red y acumuladores embarcados

La Tabla 3.6 muestra la estimación de ahorros en el caso ejemplo por mejorar la receptividad en la red, considerando la utilización de marchas económicas (marcha 1) o marchas no económicas (marcha 0). Partiendo de la Figura 3.14 y Figura 3.15 se particularizan estos resultados en la Figura 3.17.

Savings with network investments			
	Scenario	Speed profile 0	Speed profile 1
OFF-PEAK HOURS	From 2 to 3	5.85%	5.10%
	From 5 to 6	0.68%	0.33%
PEAK HOURS	From 7 to 8	18.90%	15.78%
	From 8 to 9	0%	0%
	From 11 to 12	0%	0%

Tabla 3.6: Ahorros esperables mejorando la receptividad de la red

En particular, el paso del escenario 7 al 8 valora los ahorros asociados únicamente a la transferencia de energía entre trenes, ya que el escenario 7 tiene receptividad nula y el 8 no considera dispositivos de acumulación o inversores. El ahorro atribuible a la recuperación es aproximadamente del 19%, y se reduce al 16% al considerar conducción económica (ya que hay menos energía que recuperar). Estos ahorros son similares a las medidas mencionadas en [Adinolfi et al., 1998].

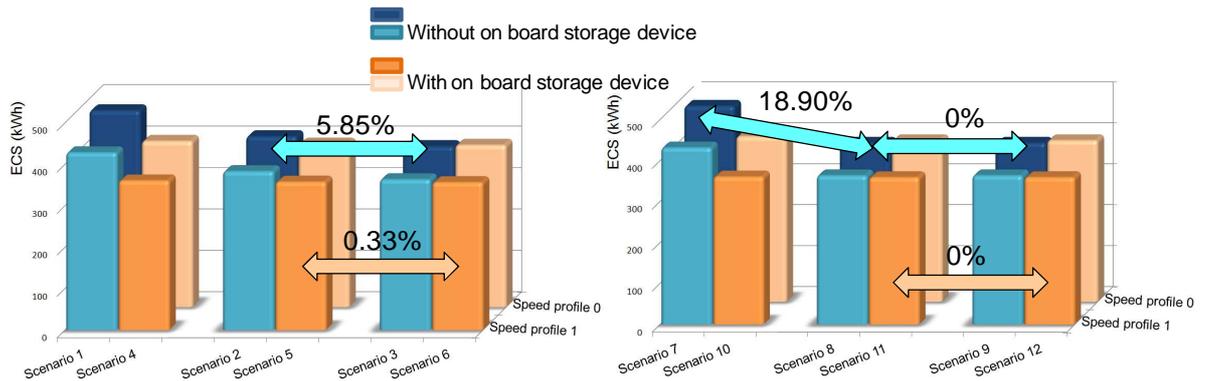


Figura 3.17: Ahorros esperables mejorando la receptividad de la red en hora valle (izquierda) y punta (derecha)

En periodos con baja frecuencia de trenes se puede esperar un 5% más de ahorros instalando inversores de potencia (del escenario 2 al 3). Sin embargo, no tendrían ventajas en horas punta (de escenario 8 a 9) ya que toda la energía regenerada es utilizada por otros trenes y no se esperan ahorros adicionales con subestaciones reversibles. Se puede concluir en este caso ejemplo que puede no merecer la pena invertir en inversores de potencia en aquellas líneas que tengan una densidad alta de tráfico. Y en ningún caso cuando los trenes están equipados con acumuladores de energía embarcados (de escenario 5 a 6 o del 11 al 12 en la Figura 3.17.).

Savings with on board energy storage device			
	Scenario	Speed profile 0	Speed profile 1
OFF-PEAK HOURS	From 2 to 5	4.44%	6.67%
	From 3 to 6	-0.81%	1.98%
PEAK HOURS	From 8 to 11	-1.56%	1.31%
	From 9 to 12	-1.56%	1.31%

Tabla 3.7: Ahorros esperables con acumuladores embarcados en los trenes

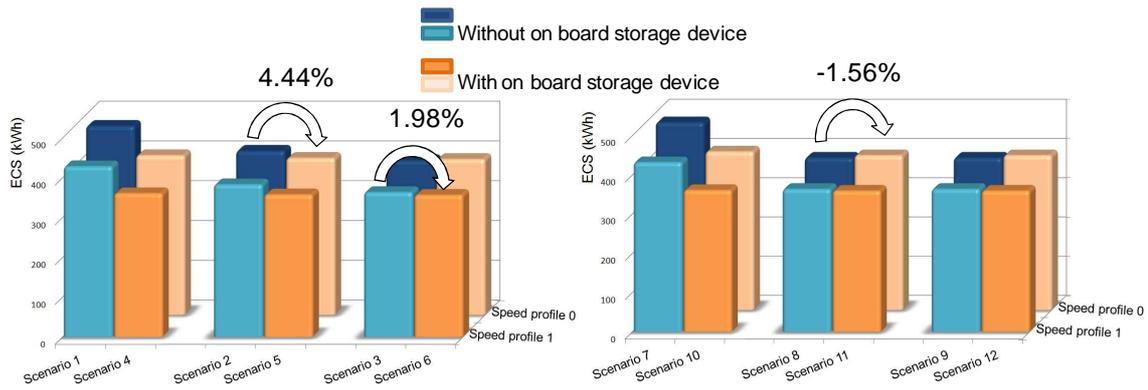


Figura 3.18: Ahorros esperables con acumuladores embarcados en los trenes en hora valle (izquierda) y punta (derecha)

Con respecto a la decisión de invertir en acumuladores de energía embarcados en los trenes, se muestra en la Tabla 3.7 los ahorros asociados para marcha económica 1 y marcha tendida 0. Partiendo de la Figura 3.14 y Figura 3.15 se particularizan estos resultados en la Figura 3.18. En conclusión, sería beneficioso tenerlos en cuenta sólo en líneas con baja densidad de tráfico que no tengan ya subestaciones reversibles (de escenario 2 al 5). En otros casos la energía neta ECS_s^t podría incluso verse incrementada, debido al incremento de masa transportada por los trenes.

3.7 Conclusiones

En este capítulo no se ha evaluado la energía consumida por el tren en pantógrafo para el diseño de marchas como en el capítulo anterior, sino en subestaciones por medio del modelo de red desarrollado, el cual constituye una de las principales aportaciones de la tesis. De esta manera se tiene en cuenta la contribución media de energía regenerada por cada tren a la reducción de consumo en subestaciones a la hora de realizar el diseño de marchas, sin necesidad de simulaciones multitren de casos particulares.

La red eléctrica se ha caracterizado por medio de dos coeficientes que dependen del escenario de tráfico analizado. Según los resultados obtenidos en el caso estudio presentado, se pueden obtener ahorros significativos gracias a un diseño óptimo de marchas (6÷11%), con una inversión muy baja y manteniendo la misma calidad de servicio. No olvidemos que estos resultados son de consumo neto en subestaciones y por lo tanto repercutirían directamente en la factura eléctrica.

El modelo propuesto se puede aplicar también para evaluar los ahorros que se obtendrían con posibles inversiones en la red para mejorar el aprovechamiento de la energía regenerada como son inversores de potencia en subestaciones o acumuladores de energía embarcados en trenes. En resumen, instalar inversores de potencia en subestaciones o acumuladores de energía embarcados en el caso de estudio únicamente proporcionarían ahorros en escenarios de baja densidad de tráfico (5÷6%), mientras que no supondrían ningún beneficio en escenarios de mucho tráfico (es más, el consumo podría verse incrementado instalando acumuladores embarcados).

Desde el punto de vista la conducción económica de los trenes (objetivo central de esta tesis), la principal conclusión es que siempre resulta eficiente optimizar la marcha del tren, ya que los ahorros que se consiguen así no se ven sustituidos al recuperar los sobreconsumos mediante el frenado regenerativo, ni siquiera aumentado la receptividad de la red. Por lo tanto es conveniente primero optimizar la conducción de una línea, y posteriormente instalar dispositivos de recuperación de energía regenerada si merece la pena.

Más allá de los resultados numéricos obtenidos, la aportación del presente capítulo ha sido el modelo de red desarrollado y el método de estudio que permite evaluar ahorros de energía en subestaciones según la manera utilizada para aprovechar y reutilizar la energía regenerada por los trenes en el frenado. Permite además comparar escenarios y ahorros potenciales, en función de si se desea implementar o no conducción económica mediante marchas óptimas.

Por último, se desea remarcar que se ha presentado un caso estudio concreto, pudiéndose obtener resultados diferentes en ejemplos de diferentes características.

3.8 Bibliografía

- ABRAHAMSSON, L. & SÖDER, L. 2011. Fast Estimation of Relations Between Aggregated Train Power System Data and Traffic Performance. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60, 16.
- AÇIKBAS, S. & SÖYLEMEZ, M. T. Parameters affecting braking energy recuperation rate in DC rail transit. ASME/IEEE 2007 Joint Rail Conference and Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference (JRC/ICE2007), March 13–16, 2007 2007. 263-268.
- AÇIKBAS, S. & SÖYLEMEZ, M. T. 2008. Coasting point optimisation for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms. *IET Electric Power Applications*, 2, 172-182.
- ADINOLFI, A., LAMEDICA, R., MODESTO, C., PRUDENZI, A. & VIMERCATI, S. 1998. Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 13, 1536-1542.
- AGENJOS, E., GABALDÓN MARÍN, A., FRANCO, F. G., MOLINA LEGAZ, R., VALERO VERDÚ, S., ORTIZ GARCÍA, M., GABALDÓN, R. J., AGENJOS, E., GABALDÓN MARÍN, A., FRANCO, F. G., MOLINA LEGAZ, R., VALERO VERDÚ, S., ORTIZ GARCÍA, M. & GABALDÓN, R. J. 2009. Energy efficiency in railways: energy storage and electric generation in diesel electric locomotives.
- BARRADE, P. & RUFER, A. Current Capability and Power Density of Supercapacitors: Considerations on Energy Efficiency. EPE 2003 : European Conference on Power Electronics and Applications, 2-4 September 2003 2003 Toulouse, France.
- BARRERO, R., TACKOEN, X. & MIERLO, J. V. 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*, 224, 207-225.
- BARRERO, R., VAN MIERLO, J. & TACKOEN, X. 2008. Energy Savings in Public Transport. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 3, 26-36.
- BATTISTELLI, L., CICCARELLI, F., LAURIA, D. & PROTO, D. 2009. Optimal Design of DC Electrified Railway Stationary Storage System. *2009 International Conference On Clean Electrical Power (Icccep 2009), Vols 1 And 2*.
- BOCHARNIKOV, Y. V., TOBIAS, A. M. & ROBERTS, C. 2010. Reduction of train and net energy consumption using genetic algorithms for trajectory optimisation. *IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010)*. Birmingham, UK: IET.
- BOCHARNIKOV, Y. V., TOBIAS, A. M., ROBERTS, C., HILLMANSEN, S. & GOODMAN, C. J. 2007. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways. *IET Electric Power Applications*, 1, 675.
- CAPUTO, L. 2000. *Control of Energy Storage Device for Rail Vehicles*. Master Thesis Master Thesis, Lund University.
- CHUANG, H. J. 2005. Optimisation of inverter placement for mass rapid transit systems by immune algorithm. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 152, 61.
- CHUANG, H. J., CHEN, C. S., LIN, C. H. & CHU, S. H. Optimization of inverter placement for mass rapid transit systems using genetic algorithm. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 Dalian, China. IEEE.

- CHYMER, M., RENFREW, A. C. & BARNES, M. Analyzing the potential of energy storage on electrified transit systems. 8th World Congress of Railway Research, 2008 Seoul, Korea.
- DESTRAZ, B., BARRADE, P., RUFER, A. & KLOHR, M. Study and simulation of the energy balance of an urban transportation network. 2007 European Conference On Power Electronics And Applications, 2-5 Sept. 2007 2007 Aalborg, Denmark. IEEE, 1-10.
- DOMÍNGUEZ, M., CUCALA, A. P., FERNÁNDEZ-CARDADOR, A., RODRÍGUEZ, R. R. & BLANQUER, J. Energy efficiency on train control: design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices. 9th World Congress on Railway Research - WCRR 2011., 2011 Lille, Francia.
- DOUGLAS, H. & PILLAY, P. Sizing ultracapacitors for hybrid electric vehicles. IECON 2005: Thirty-First Annual Conference Of The IEEE Industrial Electronics Society, Vols 1-3, 2005 New York. IEEE, 1599-1604.
- ESTÉVEZ, P. 2008. Sistemas de acumulación embarcada de energía. *Notas Técnicas ElecRail*. Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles S.A.
- FOIADELLI, F., ROSCIA, M., ZANINELLI, D. & IEEE 2006. Optimization of storage devices for regenerative braking energy in subway systems. 2006 Power Engineering Society General Meeting, Vols 1-9.
- GAY, S. E. & EHSANI, M. On-board electrically peaking drive train for electric railway vehicles. 2002 IEEE 56th Vehicular Technology Conference Proceedings (Cat. No.02CH37359), 2002/01/01/ 2002. IEEE.
- GREATBANKS, J. 2005. Review of the Discount for Using Regenerative Braking. *A Report for the Office of Rail Regulations*. London: AEA Technology Rail.
- GUNSELMANN, W. Technologies for increased energy efficiency in railway systems. 2005 IEEE 11th European Conference on Power Electronics and Applications, 2005. IEEE.
- HANMIN, L., EUIJIN, J., GILDONG, K. & CHEONHEON, A. 2009. A study on the effects of energy storage system. 2009 International Conference on Information and Multimedia Technology (ICIMT 2009). Jeju Island, South Korea: IEEE.
- HASE, S., KONISHI, T., OKUI, A., NAKAMICHI, Y., NARA, H. & UEMURA, T. 2002. Fundamental study on energy storage system for DC electric railway system. *Pcc-Osaka 2002: Proceedings Of The Power Conversion Conference-Osaka 2002, Vols I - Iii*, 1456-1459.
- IANNUZZI, D. 2008. Improvement of the Energy Recovery of Traction Electrical Drives using Supercapacitors. 2008 13th International Power Electronics And Motion Control Conference, Vols 1-5, 1469-1474.
- JONG, J. C. & CHANG, E. F. 2005. Models for Estimating Energy Consumption of Electric Trains. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 278 - 291.
- KADHIM, R. 2009. Energy storage systems for railway applications – phase 1. London: Rail Safety and Standards Board (RSSB).
- KAWASAKI 2008. SWIMO's Excellence Demonstrated. Next-generation battery-powered low-floor light rail vehicle (LRV) is passenger - and earth - friendly. *Scope*. Kawasaki Heavy Industries Quarterly Newsletter.
- KHMELNITSKY, E. 2000. On an Optimal Control Problem of Train Operation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45, 1257.

- KIM, G. & LEE, H. A Study on the Application of ESS on SeoulMetro line 2. 2009 International Conference On Information And Multimedia Technology, Proceedings, 2009. 38-42.
- KONISHI, T., HASE, S.-I. & NAKAMICHI, Y. 2004. Energy Storage System for DC Electrified Railway Using EDLC. *Quarterly Report of RTRI*.
- KONISHI, T., MORIMOTO, H., AIHARA, T. & TSUTAKAWA, M. 2010. Fixed Energy Storage Technology Applied for DC Electrified Railway. *Ieej Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 5.
- LAMIKIZ, E. Recuperación e inyección en la red de distribución, de la energía cinética excedente del sistema de metro, durante el proceso de frenado de los trenes. *In: IIR, ed. EnerTrain 2010. Sistemas y Nuevas Tecnologías en Ferrocarril para el Ahorro Energético. Últimos avances y líneas de actuación en Infraestructura, Material Rodante y Operación, 2010 Madrid. Metro de Bilbao.*
- LEE, H., KIM, G. & LEE, C. Analysis for EDLC Application on Electric Railway System. Power Conversion Conference (PCC '07), 2007 Nagoya (Japan). 226-229.
- LÓPEZ LÓPEZ, A. J., PECHARROMÁN, R. R., PILO, E., CUCALA, A. P. & FERNÁNDEZ-CARDADOR, A. Analysis of energy-saving strategies in railway power supply systems. 9th World Congress on Railway Research - WCRR 2011, 22-26 May, 2011 Lille, France.
- M.CHYMER, A. RENFREW & BARNES, M. 2006. Energy Storage Devices in Railway Systems.
- MALAVASI, G., PALLESCHI, P. & RICCI, S. 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*, 225, 475-482.
- MEINERT, M. 2009. New mobile energy storage system for rolling stock. *Epe: 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Vols 1-9*.
- MIYATAKE, M., HAGA, H. & SUZUKI, S. 2009. Optimal Speed Control of a Train with On-board Energy Storage for Minimum Energy Consumption in Catenary Free Operation. *Epe: 2009 13th European Conference On Power Electronics And Applications, Vols 1-9*, 1207-1215.
- MIYATAKE, M. & KO, H. 2007. Numerical optimization of speed profiles of inverter trains considering DC feeding circuit. *2007 Power Conversion Conference - Nagoya, Vols 1-3*. New York: IEEE.
- MIYATAKE, M. & MATSUDA, K. Optimal speed and charge/discharge control of a train with onboard energy storage devices for minimum energy operation. 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 11-13 June 2008 2008. IEEE.
- MIYATAKE, M. & MATSUDA, K. 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.
- MORITA, G., KONISHI, T., HASE, S., NAKAMICHI, Y., NARA, H. & UEMURA, T. Verification Tests of Electric Double-Layer Capacitors for Static Energy Storage System in DC Electrified Railway. 2008 International Symposium On Power Electronics, Electrical Drives, Automation And Motion, Jun. 2008. 1017-1022.
- NODA, T. & KOSEKI, T. DESIGN OF A RUN-CURVE FOR ENERGY SAVING OPERATION IN A MODERN DC-ELECTRIFICATION -EFFICIENCY ASSUMING PERFECT REGENERATIVE BRAKING. International Symposium

- on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2009 (STECH'09), 2009.6.16-19 2009 Niigata JAPAN.
- OGASA, M. 2008. Energy saving and environmental measures in railway technologies: Example with hybrid electric railway vehicles. *IEEJ Transactions On Electrical And Electronic Engineering*, 3, 15-20.
- PEÑA-ALCARAZ, M., FERNÁNDEZ, A., CUCALA, A. P., RAMOS, A. & PECHARROMÁN, R. R. 2012. 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, 397-408.
- RAMOS, A., PEÑA, M. T., FERNÁNDEZ-CARDADOR, A. & CUCALA, A. P. 2008. Mathematical programming approach to underground timetabling problem for maximizing time synchronization. *Revista CEPADE*, 95.
- REVISTA ACTUALIDAD FERROVIARIA. 2010. La solución al tranvía sin catenaria. *Actualidad Ferroviaria*.
- RICHARDSON, M. B. Flywheel energy storage system for traction applications. International Conference On Power Electronics, Machines And Drives, 2002. 275-279.
- ROASTO, I., LEHTLA, T., MOLLER, T. & ROSIN, A. Control of Ultracapacitors Energy Exchange. Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International, Aug. 30 2006-Sept. 1 2006 2006. 1401-1406.
- RUFER, A. Energy storage for railway systems, energy recovery and vehicle autonomy in Europe. 2010 International Power Electronics Conference (IPEC - Sapporo), 21-24 June 2010 2010 Sapporo, Japan. IEEE, 3124 - 3127.
- RUFER, A., HOTELLIER, D. & BARRADE, P. 2004. A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks. *Ieee Transactions on Power Delivery*, 19.
- SAGARELI, S. & GELMAN, V. 2004. Implementation of new technologies in traction power systems. *Proceedings Of The 2004 Asme/IEEE Joint Rail Conference*. New York: Amer Soc Mechanical Engineers.
- SAMESHIMA, H., OGASA, M. & YAMAMOTO, T. 2004. On-board characteristics of rechargeable lithium ion batteries for improving energy regenerative efficiency. *Quarterly Report of RTRI*, 45, 45.
- SEKIJIMA, Y., KUDO, Y., INUI, M., MONDEN, Y., TODA, S. & AOYAMA, I. Development of an Energy Storage System for DC Electric Rolling Stock by Applying Electric Double Layer Capacitor. 7th World Congress on Railway Research (WCRR), 2006 Montréal, Canada.
- SIEMENS 2001. SITRAS® SES Acumulador de energía para el transporte de cercanías.
- SÖYLEMEZ, M. T. & AÇIKBAS, S. 2004. Multi-train simulation of DC rail traction power systems with regenerative braking. *Computers In Railways IX. Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems*, 15, 941-950.
- STEINER, D. M., KLOHR, M. & PAGIELA, S. 2007. Energy storage system with Ultracaps on board of railway vehicles. *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. Aalborg, Denmark: IEEE.
- STEINER, M. & SCHOLTEN, J. Energy storage on board of DC fed railway vehicles PESC 2004 Conference in Aachen, Germany. Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, 20-25 June 2004 2004. 666-671.

- STEINER, M. & SCHOLTEN, J. Energy storage on board of railway vehicles. 2005 IEEE 11th European Conference on Power Electronics and Applications, 2005 Dresden, Germany. IEEE.
- TAGUCHI, Y., OGASA, M., HATA, H., IJIMA, H., OHTSUYAMA, S. & FUNAKI, T. 2007. Simulation results of novel energy storage equipment series-connected to the traction inverter. *2007 European Conference On Power Electronics And Applications, Vols 1-10*, 5205-5213.
- TAKAGI, R. 2010. Energy Saving Techniques for the Power Feeding Network of Electric Railways. *Ieej Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 5.
- TAKAHARA, E., WAKASA, T. & YAMADA, J. 2002. A study for electric double layer capacitor (EDLC) application to railway traction energy saving including change over between series and parallel modes. *Pcc-Osaka 2002: Proceedings Of The Power Conversion Conference-Osaka 2002, Vols I - Iii*, 855-860.
- TZENG, Y. S., WU, R. N. & CHEN, N. N. 1998. Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 47.
- XUN, J., NING, B. & LI, K. P. 2008. Multi-objective optimization method for the ATO system using Cellular Automata. *Computers In Railways XI - Computer System Design And Operation In The Railway And Other Transit Systems*, 103, 173-182.

4 Búsqueda automática de marchas eficientes en sistemas CBTC

Notación

B	Modo de conducción reduciendo velocidad por disminución de velocidad máxima
BS	Modo de conducción frenando por parada en estación
c_1, c_2	Constantes para hallar la velocidad de las partículas del MOPSO
d	Velocidad de deriva (parámetro de ATO)
D	Modo de conducción derivando
df	Deceleración de freno
EC	Energía consumida
$gbest$	Mejor valor de grupo encontrado de la función objetivo
$pbest$	Mejor valor personal encontrado de la función objetivo
p_i	Posición con mejor valor de la función objetivo de la i -ésima partícula
r_1, r_2	Números aleatorios entre 0 y 1
rg	Velocidad de regulación (parámetro de ATO)
rm	Velocidad de remotor (parámetro de ATO)
RM	Modo de conducción aplicando remotor
RT	Tiempo de recorrido
T	Modo de conducción traccionando o regulando
v_i	Velocidad de la i -ésima partícula del MOPSO
w	Peso inercia en la velocidad de las partículas del MOPSO
w_1, w_2	Valores entre los que oscila w
x_i	i -ésima partícula del MOPSO

4.1 Introducción

El diseño óptimo de marchas ATO descrito en el Capítulo 2 es válido para la mayoría de las líneas metropolitanas de alta ocupación en servicio, que están señalizadas mediante tecnología de bloqueo fijo o *Fixed Block* (FBS). La velocidad del tren se supervisa de forma continua a través del sistema ATP (Automatic Train Protection). La línea se divide en secciones reales o virtuales capaces de detectar la presencia del tren llamados “circuitos de vía” (ver Figura 4.1). A través de los circuitos de vía se puede enviar también información al ATP del tren, que es captada mediante una antena situada en el mismo. Esta información consiste, principalmente, en el número de circuitos libres hasta el siguiente tren u obstáculo. Los sistemas ATP más antiguos manejan una pareja de *códigos de velocidad* en cada circuito con valores de velocidad máxima actual y velocidad máxima de salida del circuito de vía, que se van reduciendo a medida que el tren se aproxima al circuito previo al ocupado por el tren precedente. Los sistemas ATP más modernos, por *distancia objetivo*, manejan una velocidad máxima actual y una distancia de circulación autorizada hasta el final del circuito anterior al ocupado por el tren precedente. De esta manera proporcionan un intervalo mínimo de circulación entre trenes más reducido que los sistemas por códigos de velocidad (ver Figura 4.1). En ambos casos el sistema ATO conduce el tren por debajo de los límites que le marca el ATP, tomando como referencia su velocidad máxima actual (menos un margen), y calculando curvas de freno por reducción de los códigos de velocidad, por aproximación a la distancia objetivo o por parada en estación (ver Capítulo 2, Modelo de ATO).

En la actualidad, la tendencia en líneas de nueva construcción, o para aumentar la capacidad de líneas saturadas, es instalar sistemas de “cantón móvil” o *moving block* (MBS o CBTC) [Hubbs and Mortlock, 2000] [Alexander et al., 2005] [Rumsey and Ghaly, 2004]. En este tipo de sistemas de señalización las operaciones se realizan gracias a la comunicación bidireccional inalámbrica continua entre trenes y el controlador en tierra [IEEE, 2004] [Gill, 1998]. Cada tren puede transmitir su posición, velocidad y dirección en todo momento al controlador, que a su vez envía a cada tren su distancia de circulación autorizada hasta la cola del tren precedente en línea (u obstáculo). De esta forma se mejora el intervalo de circulación (ver Figura 4.1) y por tanto la capacidad de transporte.

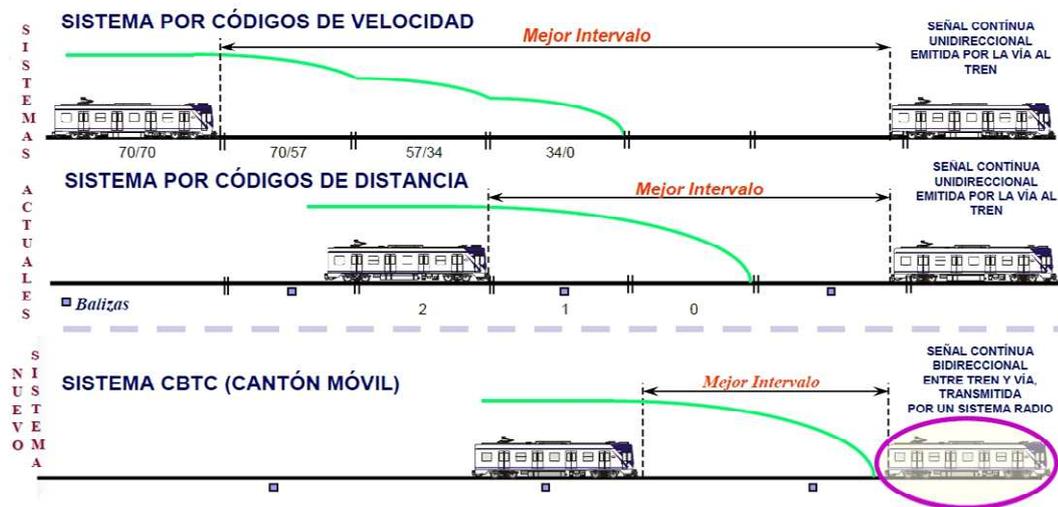


Figura 4.1: Representación de los distintos sistemas de ATP. Fuente: [González, 2005]

Los parámetros de configuración que definen la marcha ATO en los sistemas FBS, se transmiten a la antena localizada bajo el tren mediante balizas situadas a la salida de las estaciones (como en Metro de Barcelona o Madrid), o a través del circuito de vía de estacionamiento como en Metro de Bilbao. Estos parámetros (velocidad de deriva, remotor, etc.) no cambian hasta la siguiente estación, y definen la marcha del tren durante el recorrido hasta la siguiente estación. La cantidad de datos (bits) que se pueden transmitir al ATO está muy limitada por ancho de banda, lo que permite únicamente el envío de un número pequeño de valores discretos de los parámetros, dando lugar a un espacio de soluciones relativamente pequeño [Gill and Goodman, 1992] y explorable mediante simulación como se vio en el Capítulo 2.

En los sistemas CBTC los parámetros de configuración que definen la marcha ATO también se envían a través del canal de comunicación inalámbrica con el controlador en tierra, siendo necesarias las balizas sólo para reposicionar al tren en la vía. Debido a que este canal es de gran ancho de banda, desaparece la limitación de valores discretos en los parámetros ATO, pudiendo tomar valores prácticamente continuos.

Actualmente algunas implementaciones CBTC están basadas en los mismos equipos ATO utilizados en FBS y con los mismos parámetros de marcha, pero pudiendo tomar cualquier valor dentro de un rango, aumentando así enormemente el número de marchas o conducciones posibles entre dos estaciones.

La Figura 4.2 muestra el espacio de soluciones que se obtiene actualmente en una estación ejemplo de Metro de Madrid con los parámetros que se utilizan en la

actualidad y que se listan en la Tabla 4.1. Combinando los valores de dichos parámetros entre el máximo y el mínimo, con su incremento correspondiente, y con una diferencia siempre de 5km/h entre la velocidad de deriva y la de remotor a aplicar, se obtienen 156 marchas posibles. Para obtener todas ellas el tiempo de ejecución fue de menos de 1min, lo que permite la búsqueda de la curva de Pareto mediante la simulación exhaustiva como se vio en el Capítulo 2. La figura también muestra un ejemplo en el que se ha considerado que se pueden enviar muchos más valores de cada uno de los parámetros; los que se listan en la Tabla 4.2. Con este ejemplo se obtienen 20860 combinaciones posibles de los parámetros y por tanto 20860 marchas posibles entre cada dos estaciones. En este caso el tiempo de ejecución necesario para obtenerlas fue de más de 1h. Más aún, si consideramos los parámetros como variables casi continuas, como de hecho el sistema CBTC permite, se vuelve imposible obtener el espacio completo de soluciones. Sin embargo, las ventajas de este espacio de soluciones mayor son evidentes. Por ejemplo, nos permitiría seleccionar una marcha con un tiempo de recorrido entre 109s y 111s mientras que en el espacio de soluciones actual sería imposible. Por otro lado, una marcha con un tiempo de recorrido de 107s por ejemplo, consumiría 7.6kWh si únicamente contamos con las soluciones que se obtienen de la Tabla 4.1, mientras que con las marchas obtenidas a partir de la Tabla 4.2 podríamos obtener una marcha con el mismo tiempo de recorrido y con un consumo de 6.1kWh, es decir, un 20% menos de consumo gracias a las marchas adicionales que se obtienen.

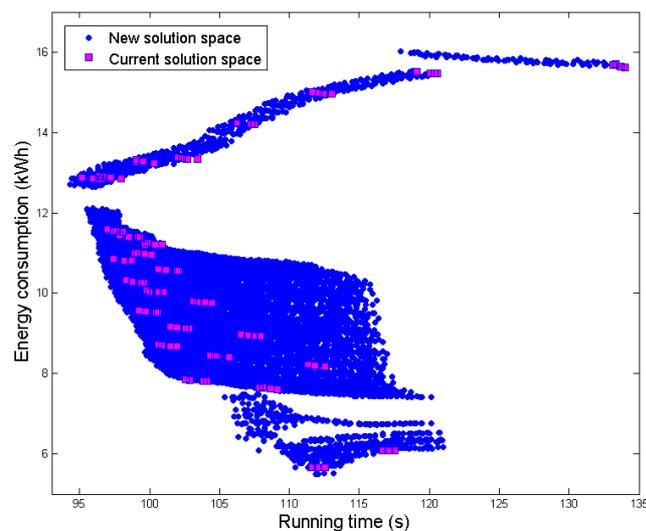


Figura 4.2: Espacio de soluciones de la interestación Almedrales 1

	Deceleration (df)	Speed-holding (rg)	Coasting speed (d)	Re-motoring speed (rm)
	(m/s ²)	(km/h)	(km/h)	(km/h)
Minimum	0.6	30	30	10
Maximum	0.75	75	75	30
Increase	0.05	5	5	10

Tabla 4.1: Valores reales de los parámetros de ATO en Línea 3 de Metro de Madrid [Domínguez et al., 2011]

	Deceleration (df)	Speed-holding (rg)	Coasting speed (d)	Re-motoring speed (rm)
	(m/s ²)	(km/h)	(km/h)	(km/h)
Minimum	0.6	30	30	5
Maximum	0.8	80	80	50
Increase	0.05	0.25	0.5	1

Tabla 4.2: Nuevos parámetros de ATO considerados

Así pues, se hace necesario un nuevo método para el diseño óptimo de marchas ATO sin pasar por la simulación exhaustiva de todas las combinaciones de parámetros. Para ello se propone en este capítulo un algoritmo de computación evolutiva multiobjetivo, con el propósito de obtener la curva óptima de Pareto basada, (tal y como se ha hecho en toda la tesis), en la simulación detallada y precisa del movimiento del tren equipado con un ATO real.

La comunicación continua del controlador con el tren permite además en los sistemas CBTC que los parámetros de configuración de la conducción ATO se envíen al tren en cualquier momento, y no solo a la salida de estación. Si el equipo ATO fuera capaz de actualizar y ejecutar cambios de parámetros (por ejemplo la velocidad de deriva) en trayecto, aumentaría de nuevo el número de posibles conducciones que se pueden ejecutar, y también las posibilidades de actuación del regulación del tráfico en tiempo real. Las posibles mejoras en diseño de la conducción y regulación de tráfico en tiempo real asociados a estas posibilidades que ofrecen los sistemas CBTC no son objeto de esta tesis, sino que constituyen futuros desarrollos.

[Ke and Chen, 2007] ya consideraron un sistema de señalización MBS, además de un gradiente medio en la vía y el jerk. Los autores dividen la distancia entre dos estaciones en secciones de igual longitud. La marcha óptima se encuentra buscando el código de velocidad óptimo de cada sección que encuentran, utilizando para ello un algoritmo MMAS. No se consideran cambios en la velocidad máxima de la línea, por lo

que no se podría aplicar fácilmente a sistemas ATO que tienen complicados algoritmos de *braking* o de reducción de velocidad.

Años más tarde se presentó un nuevo estudio [Ke et al., 2011]. En este caso sí se tienen en cuenta límites de velocidad máxima. Se propone un algoritmo para calcular en tiempo real la marcha óptima en unos 45s. A modo de ejemplo, en metros como el de Barcelona o Madrid hay interestaciones con tiempos de recorrido de unos 50s. Además incluyen un algoritmo para calcular la distancia de frenado, dejando de lado algoritmos específicos de equipos de ATO. En general la diferencia entre estos estudios orientados a MBS y los orientados a FBS [Ke et al., 2009] reside en si el cálculo se realiza en tiempo real u *off-line*. El método, sin embargo, es similar al dividir la distancia entre estaciones en “bloques” de igual longitud y tratar de hallar el código de velocidad óptimo para cada uno de ellos.

En [Gu et al., 2011] también se propone el cálculo en tiempo real. En este caso se trata de optimizar la marcha de un tren cuando el que le precede debe ser detenido o tiene alguna incidencia en su recorrido. Obtienen importantes ahorros frente a la operación tradicional pero introduciendo retrasos de hasta el 18%. Además, tratan de que el perfil de velocidad sea suave aunque eso les lleve a incrementar dicho retraso aún más. Aseguran que el algoritmo es rápido y puede obtener la marcha en 1s lo que permite su implantación en sistemas ATO, aunque como ya ocurría en los estudios vistos en el Capítulo 2, no se llegan a considerar las restricciones de funcionamiento propias de este tipo de equipos. La velocidad máxima contemplada además es constante y apenas consideran desviación en la pendiente del terreno.

En [Ho and Wong, 2003] se considera también el ahorro de energía, pero no en la marcha del tren sino más bien en la regulación. Asume que el MBS puede ocasionar largas colas de trenes que arranquen a la vez, y que por lo tanto creen picos de demanda en subestaciones que pueden resultar problemáticos. Desarrolla un sistema experto para evitar esta situación. [Yong et al., 2009] utiliza la simulación también para un óptimo control en tiempo real del tren afectado por el tren precedente en función de un intervalo calculado para MBS.

La mayoría de estos estudios se centran en ver cómo afecta el sistema MBS a los intervalos de operación o capacidad de la línea, tratando de optimizar ambos, controlando en tiempo real la aproximación de un tren al que le precede cuando éste se detiene o se retrasa. Sin embargo, el objetivo de esta tesis es calcular *off-line* las marchas óptimas que se preprogramarán en el sistema de regulación, y que por tanto deben corresponder a situaciones nominales de funcionamiento de la línea (la marcha

del tren no está afectada por el tren precedente). Será el sistema de regulación el encargado de escoger en tiempo real la marcha a enviar al tren de entre las diseñadas en función de su retraso y del retraso del resto de los trenes en la línea.

4.1.1 Técnicas de optimización

En la búsqueda de las marchas óptimas de ATO nos encontramos con un problema complejo de optimización para ser resuelto por métodos de optimización clásicos. Las diferentes restricciones, tanto de primer grado como es el cálculo de la velocidad, como cuadráticas, como es la resistencia aerodinámica del tren, hacen que el utilizar modelos analíticos incrementen la complejidad del problema en gran medida, o impliquen grandes simplificaciones como ya se mostró en el Capítulo 2.

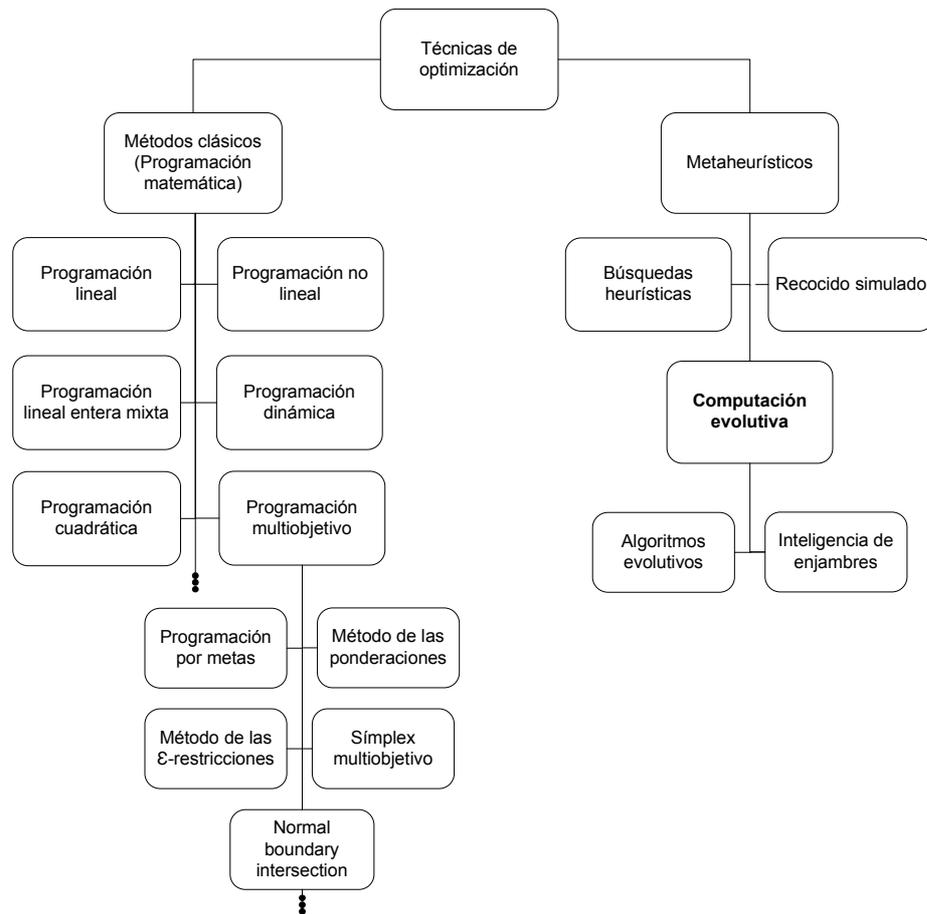


Figura 4.3: Técnicas de optimización

Por otro lado, no se trata de resolver un único problema de optimización, sino tantos como interestaciones haya en la línea a optimizar. Eso significa que nos encontraremos ante varios problemas de características distintas. Las diferencias en longitud entre estaciones, en el gradiente del terreno y en el perfil de velocidades máximas hacen que las curvas de Pareto puedan diferenciarse en gran medida entre las distintas estaciones. Podemos encontrarnos ante curvas no convexas, multimodales² y discontinuas, y espacios de soluciones con una distribución no uniforme de marchas (especialmente al descartar las marchas no confortables). Por lo tanto, un primer paso para poder encontrar la curva de Pareto de manera “automática” es seleccionar una técnica de optimización adecuada.

Podemos clasificar los principales métodos de optimización según muestra la Figura 4.3

4.1.1.1 Métodos clásicos

En [Kumar Shukla and Deb, 2007] se compararon cuatro métodos de optimización clásica con un algoritmo evolutivo en distintos problemas tipo de generación de la curva de Pareto. Todos ellos funcionaron muy bien cuando el problema era de tamaño pequeño y el espacio de soluciones no era complejo. Sin embargo los métodos clásicos se mostraron muy débiles a la hora de resolver problemas más complejos que contenían discontinuidades, multimodalidad y con una distribución no uniforme de soluciones sobre la curva de Pareto. Además, las curvas que se obtienen en algunos de los casos no son las más eficientes, quedándose en curvas de óptimos locales. Por el contrario, el algoritmo evolutivo empleado *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) fue capaz de encontrar correctamente la curva de Pareto en todos los problemas. A la luz de estos resultados, y dada la complejidad del problema que se presenta, se ha elegido un método metaheurístico para su resolución.

² Un problema multimodal es aquel que tiene varios máximos o varias soluciones posibles sobre las que no se puede decidir cuál es mejor que las otras por tener el mismo valor numérico o porque se establece un criterio de “mejor que” entre ellas MERELO, J. J. *Técnicas heurísticas de resolución de problemas: computación evolutiva y redes neuronales* [Online]. Universidad de Granada. Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores. Available: <http://geneura.ugr.es/~jmerelo/tutoriales/heuristics101/>.

TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN	FUNCIONAMIENTO FRENTE AL MOPSO
Método de las ponderaciones	<p>No puede generar puntos en zonas no convexas de la curva de Pareto [Kim and de Weck, 2006] [Jong-hyun et al., 2009].</p> <p>Puede duplicar soluciones con diferentes combinaciones de pesos [Jong-hyun et al., 2009].</p> <p>Por lo general las soluciones no se distribuyen uniformemente [Kim and de Weck, 2006].</p>
Método estocástico de Schäffler (SSM)	<p>Lento encontrando una solución bien distribuida y no óptimo local. [Kumar Shukla and Deb, 2007].</p> <p>El funcionamiento el algoritmo es pobre en curvas de Pareto no convexas [Shukla et al., 2005].</p>
Método de Timmel (TPM)	<p>Se queda en curvas de Pareto locales. Problemas con multimodalidad y con densidad no uniforme de puntos sobre la curva de Pareto [Kumar Shukla and Deb, 2007].</p>
Normal Boundary Intersection Method (NBI) y Normal Constraint Method (NC)	<p>Débil resolviendo problemas complejos multimodales, multiobjetivo y con densidad no uniforme de soluciones sobre la curva de Pareto [Kumar Shukla and Deb, 2007].</p> <p>Las soluciones encontradas no son necesariamente óptimos de Pareto [Kumar Shukla and Deb, 2007].</p> <p>Dificultades en problemas con curvas de Pareto discontinuas [Shukla et al., 2005].</p>
NSGA-II	<p>No es capaz de cubrir completamente la curva de Pareto [Coello et al., 2004].</p> <p>10-15 veces más lento que el MOPSO (dependiendo del problema) [Coello et al., 2004]</p>
Micro-GA	<p>No es capaz de cubrir completamente la curva de Pareto [Coello et al., 2004].</p> <p>Doble tiempo de computación que el MOPSO [Coello et al., 2004].</p>
PAES	<p>No es capaz de cubrir completamente la curva de Pareto [Coello et al., 2004]</p>
MOACO	<p>Generan de 2 a 3 veces menos soluciones que MOPSO [Lima M. and Barán C., 2006]</p>

Tabla 4.3: Comparación de distintas técnicas de optimización frente al MOPSO

4.1.1.2 Algoritmos metaheurísticos

Los algoritmos metaheurísticos (inteligencia artificial) se presentan como una alternativa para la búsqueda de las mejores soluciones (no siempre el óptimo global), en aquellos casos en los que es complicado emplear la matemática clásica. Nacieron con los algoritmos de búsqueda directa ya en los años 60 y gracias a la evolución de las herramientas de cálculo y software han ido siendo sustituidas por técnicas más sofisticadas [Robert M Lewis et al., 2000]. Estas nuevas técnicas imitan fenómenos de la naturaleza como el *recocido simulado* (simulated annealing), o la evolución de las especies. Esta última sería una rama de la inteligencia artificial conocida como *computación evolutiva* (Evolutionary Computation - EC).

El objetivo de la EC es encontrar la mejor solución a un problema imitando los mecanismos de la evolución de las especies. Se engloban dentro de esta característica distintos algoritmos que parten de una población de individuos y que a lo largo de distintas iteraciones evolucionan en función de las reglas particulares de cada algoritmo en particular. Los individuos además, intercambian información sobre su búsqueda del óptimo a lo largo de las iteraciones. La manera en la que se aplique esta técnica general permite distinguir entre algoritmos evolutivos (*Evolutionary Algorithms - EA*) e inteligencia de enjambres (*Swarm Intelligence – SI*) [Muñoz et al., 2008] (Figura 4.4).

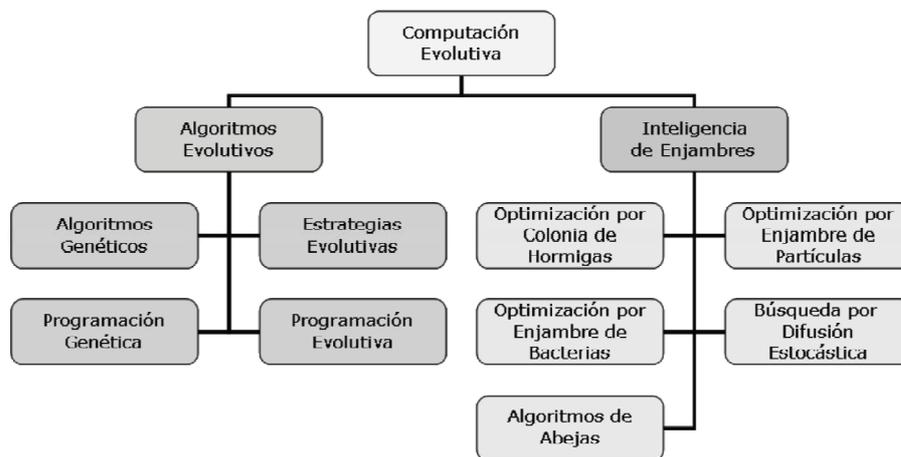


Figura 4.4: Técnicas de computación evolutiva. Fuente [Muñoz et al., 2008]

Los algoritmos genéticos (*Genetic Algorithm – GA*) son los más conocidos dentro de los EA. Los individuos de la población se reproducen, cruzan y mutan emulando el modelo de la evolución biológica. Sin embargo, la SI está tomando fuerza también en

los últimos años con sus dos principales algoritmos de optimización por enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) y por colonia de hormigas (*Ant Colony Optimization* – ACO).

La optimización mediante PSO [Kennedy and Eberhart, 1995] [Kennedy and Eberhart, 2001] imita el comportamiento de insectos, pájaros, peces, abejas o cualquier individuo que se mueva en “colonias” de forma conjunta para cazar o conseguir comida. Es un método de optimización para funciones no lineales en espacios continuos y discretos [Muñoz et al., 2008]. Utiliza una población de individuos, o potenciales soluciones, llamados partículas que se mueven en el espacio de soluciones memorizando el mejor valor de función objetivo que han encontrado hasta el momento, de manera individual y global, y que actuarán a modo de guía conduciendo la búsqueda.

Aunque en un primer momento la EC se empleó en problemas de un único objetivo, se han ido desarrollando y empleando también en problemas multiobjetivo (*multiobjective optimization problems* - MOOP) gracias a su buen funcionamiento en la búsqueda de múltiples soluciones de Pareto. Ejemplos de ello son el algoritmo de optimización multiobjetivo por enjambre de partículas (*Multi-objective Particle Swarm Optimization* - MOPSO) [Coello et al., 2004], el *Non-dominated Sorting* PSO (NSPSO) [Li, 2003], la función de agregación para PSO [Parsopoulos and Vrahatis, 2002], el NSGA-II [Deb et al., 2002] y el *Pareto Archived Evolution Strategy* (PAES) [Knowles and Corne, 2000].

El ajuste de distintos algoritmos de computación evolutiva multiobjetivo fue probado en [Coello and Lechuga, 2002] aunque en funciones sin restricciones. En todas las funciones de prueba utilizadas el MOPSO se comporta mejor que el NSGA II y el PAES, tanto en la métrica de valoración utilizada como en tiempos de ejecución. Además, la representación gráfica de las curvas de Pareto obtenidas en cada caso mostraba que el MOPSO encuentra soluciones mejor distribuidas y más cercanas a la curva de Pareto real que los otros algoritmos. Posteriormente se volvió a probar el MOPSO frente a otros algoritmos de optimización multiobjetivo en [Coello et al., 2004], resultando ser el MOPSO el que generaba el mejor conjunto de soluciones no dominadas próximas a la curva de Pareto real. Fue el único capaz de cubrir la curva de Pareto completa requiriendo además, menor tiempo de ejecución. También se probó en [Lima M. and Barán C., 2006] frente a algoritmos ACO, mostrando mejores soluciones en al menos 3 de las 4 métricas que emplearon. En consecuencia, los buenos resultados mostrados en el funcionamiento del algoritmo justifican su selección

en esta tesis para generar automáticamente la curva de Pareto con las marchas óptimas de ATO, objetivo del presente capítulo.

En la Tabla 4.3 se muestra una tabla resumen con la comparación de distintos algoritmos de optimización multiobjetivo frente al MOPSO.

4.1.2 Desarrollo del capítulo

En primer lugar se planteará el problema de generación automática de la curva de Pareto de marchas óptimas, y se formulará el algoritmo MOPSO propuesto para su resolución. Posteriormente se validará el algoritmo y se utilizará en el caso estudio. Se propondrá un análisis de curvas de Pareto por patrones de conducción y se evaluará la robustez de las soluciones. Finalmente se mostrará la validez del algoritmo también con parámetros continuos.

4.2 Algoritmo MOPSO para el diseño de marchas

4.2.1 El problema

Recordemos de nuevo que los objetivos a minimizar a la hora de elegir las marchas óptimas son el tiempo de recorrido (RT) y la energía consumida (EC), siempre respetando los criterios de confort y restricciones operativas existentes.

Las variables de diseño como ya se vio en el Capítulo 2, son los parámetros de configuración de la marcha ATO que el tren recibe por medio de balizas o radio (CBTC) en cada interestación. En el caso ejemplo que se mostrará más adelante se considerarán los parámetros del equipo ATO de Dimetronic: deceleración de freno (df), velocidad de regulación (rg), velocidad de deriva (d) y velocidad de remotor (rm) (ver Tabla 4.1 y Tabla 4.2)

4.2.2 Formulación del algoritmo PSO

El algoritmo PSO conduce a una población de partículas a la búsqueda del óptimo. Las partículas “vuelan” sobre el espacio de soluciones buscando las zonas con mejor valor de la función objetivo. En el problema que aquí se plantea, al tratarse de un caso de minimización, las partículas se dirigirán a las regiones que proporcionen valores menores de la función objetivo respecto a las regiones visitadas previamente. Cada

partícula se trata como un punto en un espacio N-dimensional, que ajusta su propio “vuelo” de acuerdo a la experiencia de vuelo personal anterior y a la del resto de partículas. De esta manera se van modificando los valores de la solución no dominada encontrada por la partícula (mejor personal - $pbest$), y de la solución no dominada encontrada por la población (mejor global - $gbest$), hasta que la población por completo converja al punto óptimo o casi óptimo del espacio de soluciones.

La notación que se utiliza en PSO, ya particularizada a nuestro problema, se describe a continuación: la i -ésima partícula de la población es una combinación concreta de parámetros de ATO, y en consecuencia una determinada marcha. Se representa en la iteración t por un vector de 4 dimensiones puesto que contamos con 4 variables de decisión (df , rg , d y rm): $\mathbf{x}_i(t) = (df_i, rg_i, d_i, rm_i)$. Cada partícula o marcha tiene también una velocidad que en la iteración t es $\mathbf{v}_i(t) = (vdf_i, vrg_i, vd_i, vrm_i)$. La mejor posición encontrada por la partícula anteriormente, es decir, la posición con el mejor valor de la función objetivo de la i -ésima partícula, es $\mathbf{p}_i(t) = (pdf_i, prg_i, pd_i, prm_i)$. La mejor combinación de parámetros encontrada por la población, es decir, la marcha con el menor valor de la función objetivo encontrada en las iteraciones anteriores, se indica con el subíndice g . En una iteración t cualquiera la nueva velocidad de la partícula basada en su velocidad previa y las distancias desde su posición actual a su $pbest$ y $gbest$ se actualiza utilizando la ecuación (4.1), y posteriormente se utiliza (4.2) para calcular la nueva posición de la partícula.

$$\vec{v}_i(t) = w \cdot \vec{v}_i(t-1) + c_1 \cdot r_1 \cdot (\vec{p}_i - \vec{x}_i(t-1)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (\vec{p}_g - \vec{x}_i(t-1)) \quad (4.1)$$

$$\vec{x}_i(t) = \vec{x}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, NP \text{ y } t = 1, 2, \dots, IT \quad (4.2)$$

Donde:

NP es el tamaño de la población

IT es el número máximo de iteraciones

c_1 es una constante positiva que indica la influencia máxima de la mejor experiencia individual de la partícula en su nueva velocidad

c_2 es una constante positiva que indica la influencia máxima de la información social del nuevo valor de velocidad de la partícula

r_1, r_2 son números aleatorios entre 0 y 1

w es el peso inercial

El parámetro w controla el impacto de la historia previa de las velocidades en la velocidad actual, influenciando el compromiso entre la experiencia global y local [Shi and Eberhart, 1998]. Un peso inercial alto favorece una exploración global (explorando nuevas áreas), mientras que uno pequeño tiende a facilitar una exploración local (afinando la búsqueda en el área actual). Es por ello que decrece durante la ejecución del algoritmo entre w_1 y w_2 (Tabla 4.4). Un valor adecuado de peso inercial puede facilitar un balance entre búsquedas locales y globales, dando lugar por tanto a menores iteraciones para encontrar el óptimo [Muñoz et al., 2008]. La Tabla 4.4 muestra los valores seleccionados para los parámetros mostrados, ajustados mediante el caso ejemplo que se explicará a continuación.

c_1	c_2	w_1	w_2	Top select (%)	Top select probability (%)
1	1	0.9	0.2	6	98

Tabla 4.4: Valores utilizados para los parámetros del MOPSO-CD

Los parámetros *Top select* y *Top select probability* de la tabla anterior intervienen en el algoritmo de actualización del *gbest*, descrito en el siguiente apartado.

4.2.3 Funcionamiento para generar la curva de Pareto multiobjetivo (MOPSO)

Recordemos que el objetivo final es el diseño las marchas ATO considerando el doble objetivo de tiempo y consumo, por lo tanto no se trata de buscar únicamente un punto óptimo sino todo el conjunto de marchas con diferentes tiempos de recorrido y el menor consumo posible. Este conjunto define la curva de Pareto compuesta por puntos no dominados entre sí (ninguno es mejor que otro en ambos objetivos). Se trata por tanto de una optimización multiobjetivo MOOP, por lo que es necesario utilizar el algoritmo MOPSO en lugar del PSO para objetivo único, siendo su formulación idéntica a la vista hasta ahora a falta de definir el criterio de comparación entre posiciones que permita actualizar la mejor solución personal *pbest* y la mejor global *gbest* considerando los dos objetivos a minimizar. Estas variables *gbest* y *pbest* actúan como “guías” para las partículas (combinación de parámetros ATO o marchas) dirigiendo su búsqueda. La principal dificultad en el MOPSO es precisamente encontrar la mejor forma de seleccionar dichas guías para cada combinación de parámetros ATO de la población. El algoritmo que se va a emplear es similar al ya

descrito en [Coello and Lechuga, 2002] [Coello et al., 2004], y [Alvarez-Benitez et al., 2005].

El algoritmo mantiene un archivo externo A , que contiene las marchas no dominadas encontradas hasta el momento por las partículas, y que formarán la curva de Pareto solución al finalizar el algoritmo. Al comienzo de la ejecución se genera una población de NP combinaciones de parámetros. Tanto las posiciones de estas partículas (\mathbf{x}_i) como sus velocidades (\mathbf{v}_i) son inicializadas aleatoriamente y discretizadas (a menos que consideremos parámetros continuos), y todas las posiciones no dominadas inicializan el archivo A . Los valores de los parámetros se mantienen dentro de sus límites tabulados en la Tabla 4.2. En cada iteración t las velocidades y posiciones de las partículas se actualizan utilizando las ecuaciones (4.1) y (4.2) respectivamente, y se comprueba también que se mantienen dentro del área limitada del espacio de soluciones. Para cada nueva posición se calcula mediante el simulador el vector \mathbf{y}_i de objetivos: energía consumida $EC(\mathbf{x})$ y tiempo de recorrido $RT(\mathbf{x})$, $\mathbf{y}_i=(EC(\mathbf{x}), RT(\mathbf{x}))$.

Como se ha mencionado previamente una parte importante del MOPSO es seleccionar los $pbest$ y $gbest$. En el caso del cálculo del primero, si la nueva posición domina al actual $pbest$, es decir, si \mathbf{x}_i tiene un valor menor o igual de ambos objetivos que su actual $pbest$, entonces el nuevo $pbest$ (\mathbf{p}_i) se iguala a la posición actual \mathbf{x}_i . Si por el contrario mejora únicamente uno de los dos objetivos, se igualará a la posición actual o se mantendrá el valor de \mathbf{p}_i con probabilidad del 50%.

Si algún miembro de A es dominado por la nueva \mathbf{x}_i , es decir, si la nueva posición de \mathbf{x}_i tiene un valor menor de ambos objetivos o menor de uno de ellos e igual de otro, se sustituiría dicho miembro por la nueva \mathbf{x}_i . Esto significa que ningún miembro del archivo es dominado por ninguna \mathbf{x}_i y los miembros de A tampoco se dominan mutuamente. En consecuencia todos los miembros del archivo son candidatos a $gbest$. Sin embargo, si los miembros del archivo son seleccionados como $gbest$ sin ningún criterio en función de una probabilidad uniforme, el resultado puede ser una curva de Pareto con bastantes “huecos” intermedios. En una optimización multiobjetivo no sólo se trata de dirigir la búsqueda hacia la curva de Pareto, sino también de generar una curva distribuida uniformemente [Raquel and Naval, 2005]. Con este objetivo, se ha mejorado el algoritmo MOPSO, incluyendo el mecanismo de *crowding distance* (CD) en la selección del $gbest$, que se puede encontrar en [Raquel and Naval, 2005] con la intención de conseguir una distribución más uniforme de las marchas sobre la curva de Pareto.

El CD de una marcha es la distancia media a sus dos soluciones vecinas cuando todas las marchas se ordenan por valor de la función objetivo (la suma de ambos objetivos). A las marchas situadas en los dos extremos de la curva se les asigna un CD infinito de manera que siempre tienen el mayor valor. En el algoritmo MOPSO-CD el *gbest* de las partículas se selecciona de manera aleatoria asignando una probabilidad definida por el parámetro *Top select probability*, en este caso 98% (ver Tabla 4.4) a las partículas de valor de CD alto, y una probabilidad del 2% a las partículas con valor de CD bajo. El conjunto de partículas de CD alto estará formado por el 6% (parámetro *Top select*, ver Tabla 4.4) de las partículas que tiene mayor CD. Esto permite a la población moverse hacia áreas con menor número de soluciones encontradas, consiguiendo como se verá en el caso estudio una curva de Pareto sin huecos. El algoritmo se describe en la Figura 4.5.

<pre> A = ∅ For i=1:NP {x_i, v_i} Y_i = f(x_i)=[EC(x_i),RT(x_i)] p_i = x_i End For </pre>	<p>Se inicializa un archivo vacío Para todo el tamaño de la población Inicializar aleatoriamente la posición y velocidad de las partículas Evaluar las partículas según la función objetivo Inicializa el <i>pbest</i> de cada partícula</p>
<pre> A = x_i x_i < x_j con i, j=1,2,..NP p_g = Random(A) </pre>	<p>Crea el archivo con las soluciones no dominadas Se genera la guía con una partícula del archivo</p>
<pre> For t=1:T For i=1:NP For d=1:D v_{id} = wv_{id}+r₁(p_{id}-x_{id})+r₂(p_{gd}-x_{id}) x_{id} = x_{id}+v_{id} End For x_i := Check bounds(x_i) Y_i := (EC(x_i),RT(x_i)) If x_i < u ∀u ∈ A then A = {u ∈ A u < x_i} A = A U x_i End If End For CD(Y_i)=CD(EC(x_i))+CD(RT(x_i)) ∀i=1,2,..NP A = Sort(A) p_g = select Guide(A) If x_i ≤ p_i Then p_i = x_i ∀i=1,2,..NP End For </pre>	<p>Durante <i>T</i> iteraciones Para las <i>NP</i> partículas Para cada componente. Espacio D-dimensional Actualizar velocidades de las partículas Actualizar posiciones de las partículas</p> <p>Comprobar límites Evaluar las partículas según la función objetivo Comprobar si la partícula es dominante Eliminar del archivo las soluciones dominadas por la nueva partícula Añadir la particular dominante al archivo</p> <p>Calcular la <i>crowding distance</i> (CD) para cada objetivo Ordenar las soluciones del archivo en orden decreciente de CD Actualizar la guía (<i>gbest</i>) seleccionando una partícula del P% superior del archivo Actualizar <i>pbest</i></p>

Figura 4.5: Algoritmo MOPSO-CD

4.3 Caso estudio y resultados

Una vez definido el algoritmo a emplear se ha comparado su resultado con la curva de Pareto obtenida mediante simulación exhaustiva de todo el espacio de soluciones para poder verificar la validez de la solución. De esta manera el algoritmo ha sido validado antes de su aplicación al caso real.

4.3.1 Pruebas y validación

Se ha considerado una estación ficticia de 2125m con perfil plano (Figura 4.6) para probar la validez del algoritmo MOPSO-CD en el problema de la conducción ATO eficiente. Se ha escogido este ejemplo ya que el tiempo de ejecución necesario es pequeño en comparación con una estación real, gracias al terreno llano y el perfil sencillo de velocidades máximas. De esta manera es adecuado para una primera validación del algoritmo así como para el ajuste de los parámetros del algoritmo (Tabla 4.4).

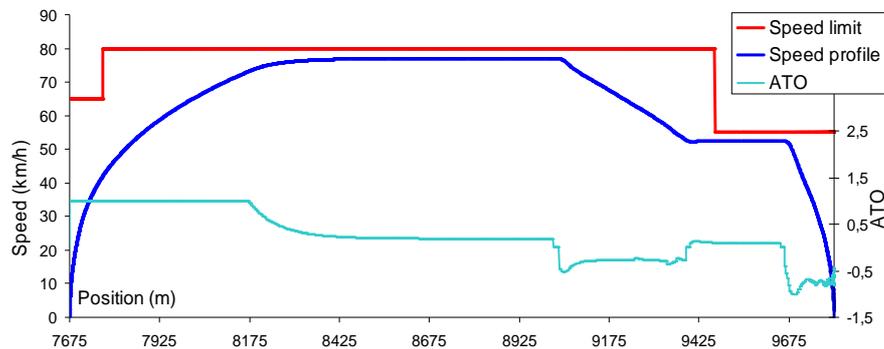


Figura 4.6: Marcha tendida del caso ejemplo

El tiempo de ejecución para obtener el espacio completo de soluciones con búsqueda exhaustiva utilizando los parámetros de la Tabla 4.2 fue de 13min, mientras que únicamente se necesitaron 29s para obtener la curva de Pareto proporcionada por el algoritmo MOPSO con 40 partículas, 20 iteraciones y los parámetros de la Tabla 4.4. Más importante aún es la gran diferencia existente entre el incremento de tiempo de ejecución de la simulación exhaustiva respecto al número de soluciones posibles o combinación de parámetros. La Figura 4.7 muestra cómo el tiempo de ejecución para la simulación exhaustiva crece drásticamente cuando el tamaño del espacio de

soluciones aumenta. El tiempo de ejecución del algoritmo MOPSO-CD sin embargo permanece aproximadamente constante. Estos resultados, justifican su utilización.

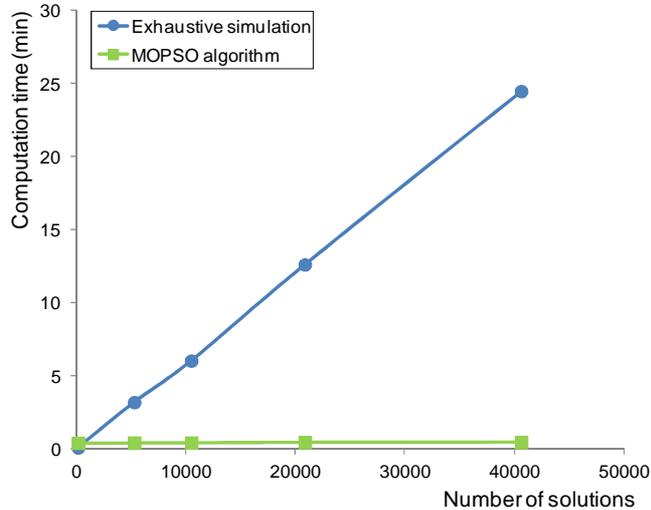


Figura 4.7: Tiempos de ejecución del algoritmo MOPSO-CD y de simulación exhaustiva en función del número de soluciones

Para comprobar el ajuste de la curva de Pareto obtenida mediante el algoritmo MOPSO-CD se superpone dicha curva en el gráfico de la simulación exhaustiva de todas las combinaciones de parámetros de la Figura 4.8. Cada punto (marcha) de la curva de Pareto del MOPSO-CD debe pertenecer también al espacio de soluciones. De lo contrario sería una marcha obtenida mediante una combinación de parámetros no contemplada en la Tabla 4.2.

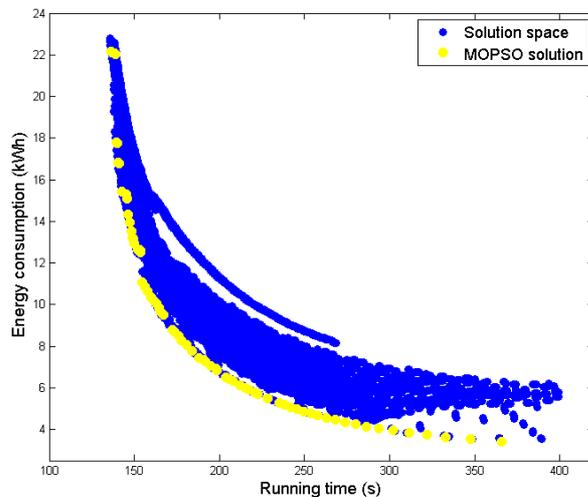


Figura 4.8: Espacio de soluciones y curva de Pareto del MOPSO-CD para una interestación

4.3.2 Aplicación a una línea real de metro

Como se ha visto en la Figura 4.8, el algoritmo MOPSO-CD funciona bien encontrando la curva de Pareto en el espacio de soluciones de todas las marchas de ATO posibles entre dos estaciones. El ejemplo mostrado se trataba de un caso muy sencillo y no real, mientras que el objetivo es poder aplicar el método a líneas metropolitanas reales. Por lo tanto se ha utilizado el algoritmo para obtener las soluciones óptimas en la misma línea que se ha venido utilizando hasta ahora (ver caso ejemplo del apartado 2.3.1), pero considerando que es posible su funcionamiento con los parámetros mostrados en la Tabla 4.2.

La Figura 4.9 muestra el espacio de soluciones de todas las marchas que se obtienen con dichos parámetros (Tabla 4.2) en la estación de San Cristobal 1. El tiempo de ejecución para obtener la nube completa fue de 50min. La solución obtenida con el algoritmo MOPSO-CD se superpone en el mismo gráfico para comprobar su idoneidad. Esta solución se obtuvo en casi una quinta parte de tiempo de ejecución, utilizando para ello los parámetros de la Tabla 4.4. De aquí se concluye que el algoritmo MOPSO-CD calcula las marchas óptimas para diferentes tiempos de recorrido sin que sea necesario recurrir a la simulación exhaustiva de todas las marchas de ATO.

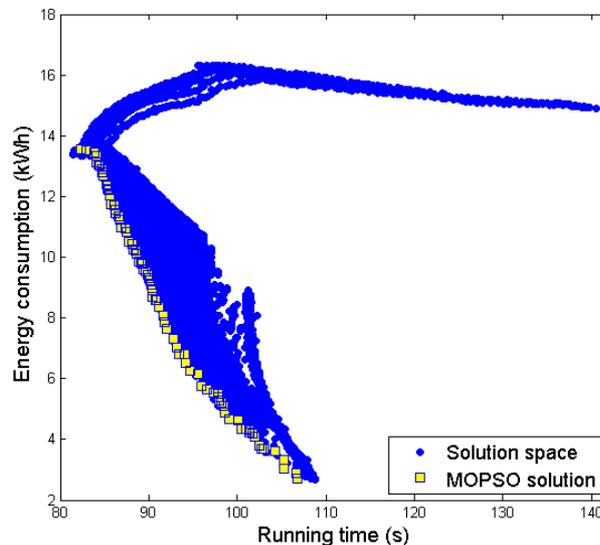


Figura 4.9: Espacio de soluciones y resultado del algoritmo MOPSO-CD con 80 partículas y 50 iteraciones en la interestación de San Cristobal 1

Una vez comprobado el buen funcionamiento del algoritmo en un caso real, el objetivo es encontrar las marchas más eficientes para todos los tiempos de recorrido

posibles entre cada dos estaciones del caso estudio. La Figura 4.10 muestra las curvas de Pareto halladas por el algoritmo MOPSO-CD en distintas interestaciones del caso estudio. A partir de estas soluciones es posible escoger tantas como se necesiten para ser programadas en el sistema de regulación de tráfico.

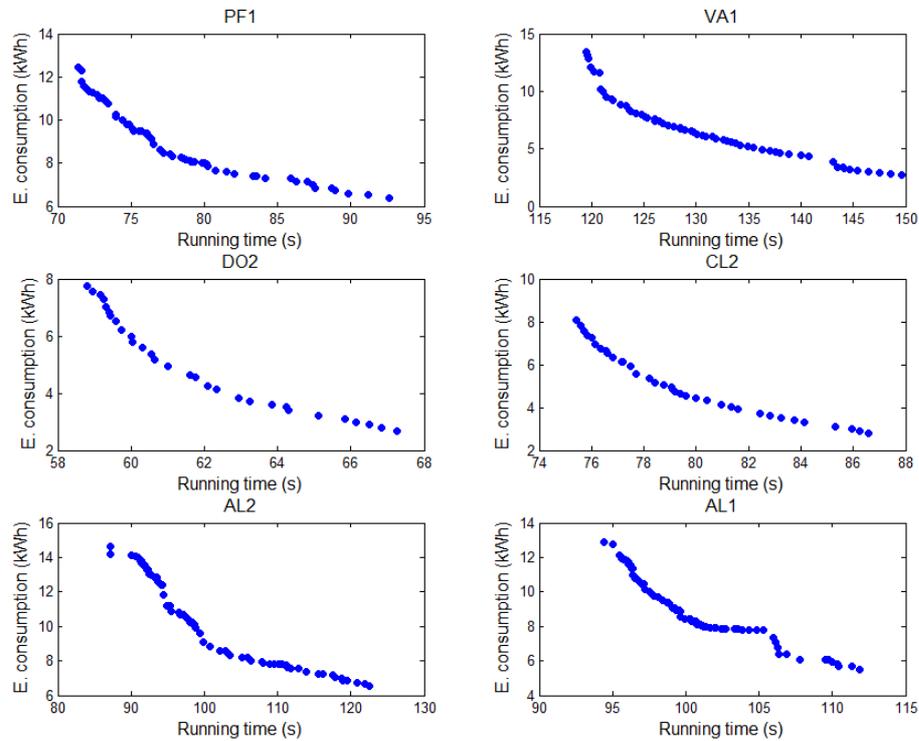


Figura 4.10: Curvas de Pareto obtenidas con el MOPSO-CD con 80 partículas y 50 iteraciones

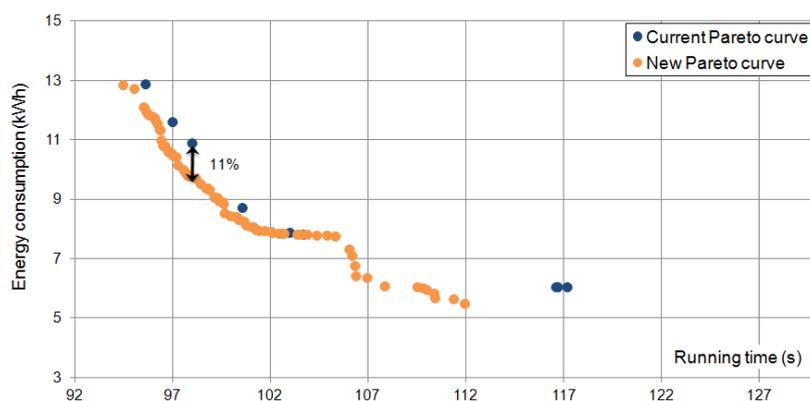


Figura 4.11: Comparación de la nueva curva de Pareto y la actual en Almendrales 1

A modo de ejemplo se muestra en la Figura 4.11 una comparación de una de las curvas de Pareto de la Figura 4.10 (la de la interestación de Almendrales 1) frente a la

curva que se obtendría utilizando los parámetros actuales (parámetros de la Tabla 4.1). Como se ve, no sólo la curva de Pareto tiene una densidad mayor de soluciones como era de esperar, sino que además dichas soluciones mejoran a las que se puede obtener actualmente, consiguiéndose hasta un 11% de ahorro con alguna de las marchas.

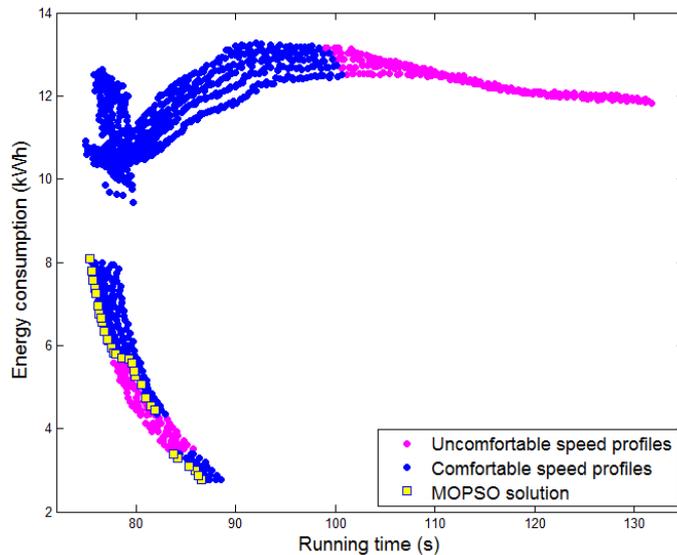


Figura 4.12: Espacio de soluciones de la intersección Ciudad de los Ángeles 2 y resultado del MOPSO-CD con 100 partículas y 30 iteraciones

En los ejemplos mostrados hasta ahora no se tenía en cuenta el confort ni las restricciones operativas, requisitos imprescindibles para que sea posible la implementación de las marchas como ya se ha mencionado varias veces. Por lo tanto, se han incluido en el algoritmo MOPSO-CD aquellas restricciones que descartan marchas no confortables o marchas que no cumplen las velocidades mínimas de paso por curva para que no sean seleccionadas nunca como posibles soluciones. La Figura 4.12 muestra cómo la solución obtenida por el MOPSO está formada por diferentes puntos, siendo todos ellos marchas confortables y que respetan las velocidades mínimas de paso por curva. Se ve también como la curva de Pareto muestra “huecos” o zonas vacías sin soluciones. Esto sin embargo no se debe a un mal funcionamiento del algoritmo MOPSO-CD sino todo lo contrario. Muchas marchas son descartadas y por lo tanto la curva de Pareto muestra huecos dando como resultando una curva “discontinua”.

4.3.3 Patrones de conducción

Combinaciones diferentes de parámetros pueden dar lugar al mismo tipo de marcha o patrón de conducción. Por ejemplo, con los valores de los parámetros de la Tabla 4.6 se obtiene una marcha con un patrón *Tracción-Deriva-Detención* T-D-BS (ver Tabla 4.5 para nomenclatura) (Figura 4.13). En algunos casos puede resultar útil identificar los distintos conjuntos de patrones de conducción para tomar una decisión de implementación. Un tipo de conducción puede ser preferible frente a otra cuando existen dos curvas diferentes con el mismo tiempo de recorrido y similar consumo por razones de confort o robustez. Se propone un análisis de las marchas (y en consecuencia de la curva de Pareto) en función de los distintos patrones de conducción disponibles de manera que el diseñador pueda escoger los patrones más convenientes a la hora de elegir las marchas a implementar.

T	Tracción
D	Deriva
RM	Remotor
B	Freno
BS	Freno de detención

Tabla 4.5: Significado de las siglas en los patrones de conducción

Deceleration	Speed-holding	Coasting speed	Re-motoring speed
(m/s ²)	(km/h)	(km/h)	(km/h)
0.7	0	60	10

Tabla 4.6: Combinación de parámetros que da lugar al patrón de conducción de la Figura 4.13

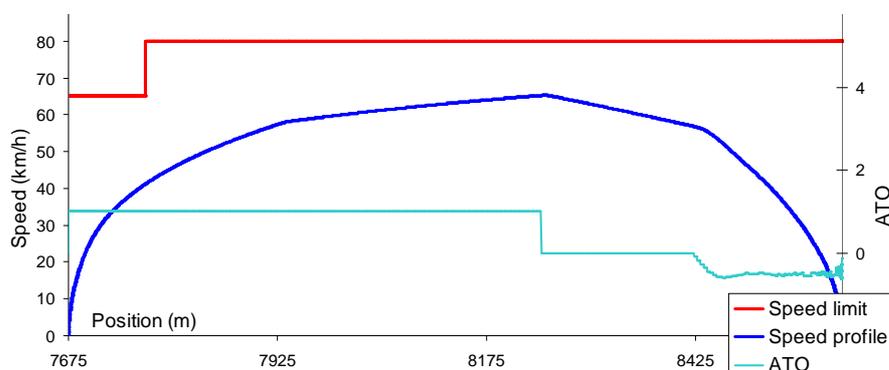


Figura 4.13: Patrón de conducción T-D-BS

La Figura 4.14 muestra un ejemplo de espacio de soluciones diferenciando los distintos patrones de curvas con colores. Se muestra también la curva de Pareto que obtiene el MOPSO.

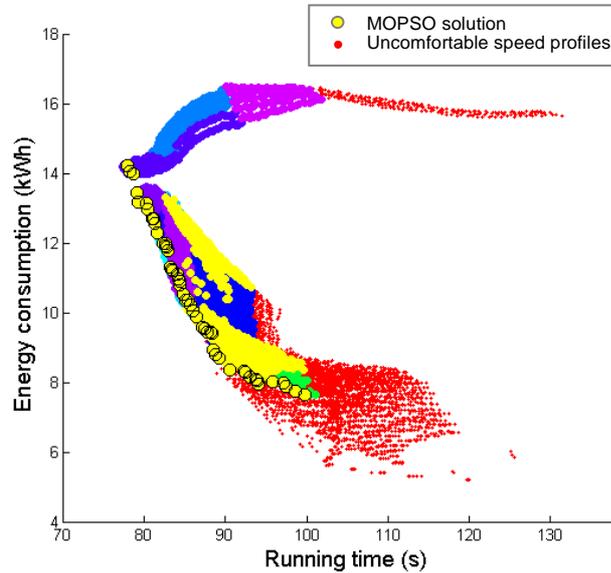


Figura 4.14: Conjuntos de curvas por patrones en Villaverde Bajo Cruce 1

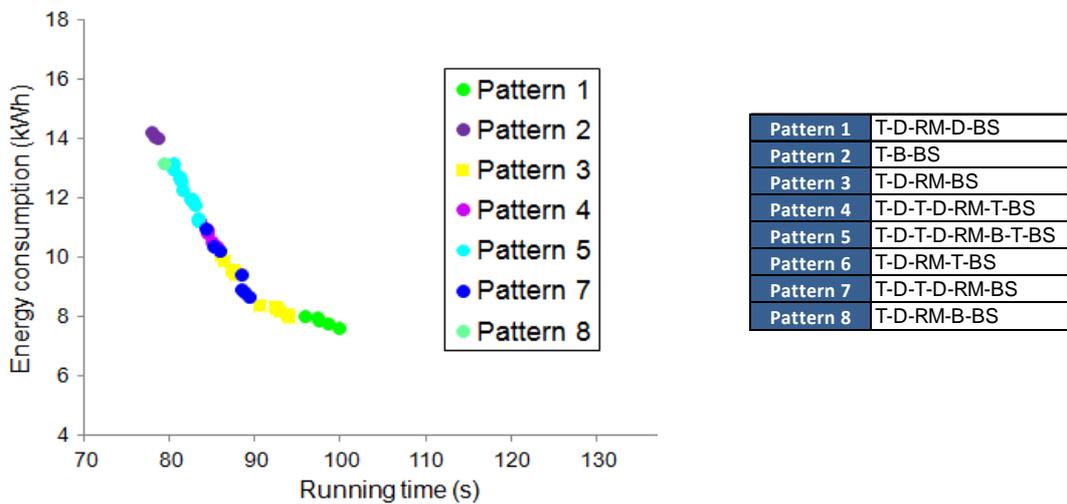


Figura 4.15: Patrones de curvas que forman la curva de Pareto de la Figura 4.14

Para analizar la curva de Pareto se propone obtener las curvas diferenciadas por cada tipo o patrón de conducción. El proceso a seguir sería el siguiente:

- Obtener la curva de Pareto total (Figura 4.14)

- Obtener los distintos patrones de conducción que existen en las soluciones que forman parte de la curva de Pareto (Figura 4.15). El simulador proporciona este dato.
- Obtener las curvas de Pareto de cada patrón de conducción indicándole al MOPSO-CD que evite soluciones cuyo patrón no se ajuste al especificado (Figura 4.16).
- Comprobar qué patrones son preferibles frente a otros.
- Escoger la envolvente de todas las curvas de Pareto (Figura 4.18).

Aplicando este proceso al ejemplo de la Figura 4.14 se observa que la curva de Pareto está formada por 8 patrones de conducción diferentes (Figura 4.15). Se han obtenido las 8 curvas de Pareto que se muestran en la Figura 4.16, junto con la envolvente que el diseñador escogería *a priori*. Escogemos ahora una marcha de los patrones 1 (T-D-RM-D-BS) y 6 (T-D-RM-T-BS) (ver Tabla 4.5 para nomenclatura) y dibujamos sus perfiles en la Figura 4.17. Como se puede ver, ninguna de las 2 marchas dibujadas incumple ninguno de los criterios de confort definidos (velocidad mínima, número máximo de remotores, duración mínima del modo y corte de tracción en rampa fuerte), (ver apartados 2.4.4 y 2.4.5). Tampoco incumplen velocidades mínimas de paso por curva. Aún así sería conveniente evitar la implementación de marchas del patrón 1 ya que la deriva tan próxima al freno final puede resultar incómoda para los viajeros, mientras que el patrón 6 parece perfectamente adecuado.

Con esta discriminación por patrones de conducción, la curva de Pareto se vería modificada obteniéndose la de la Figura 4.18

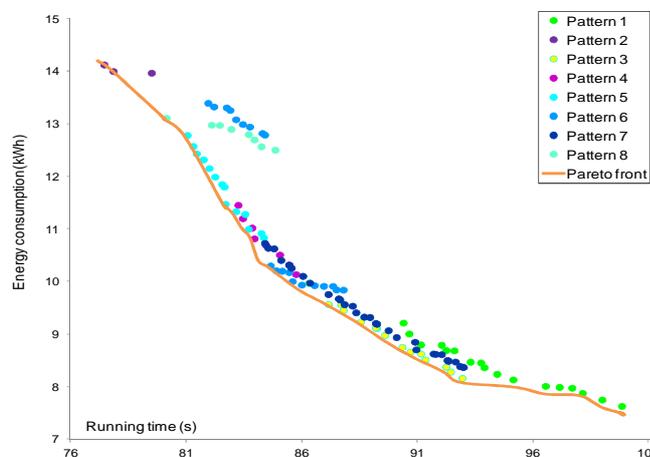


Figura 4.16: Curvas de Pareto de los diferentes patrones de conducción de la Figura 4.15

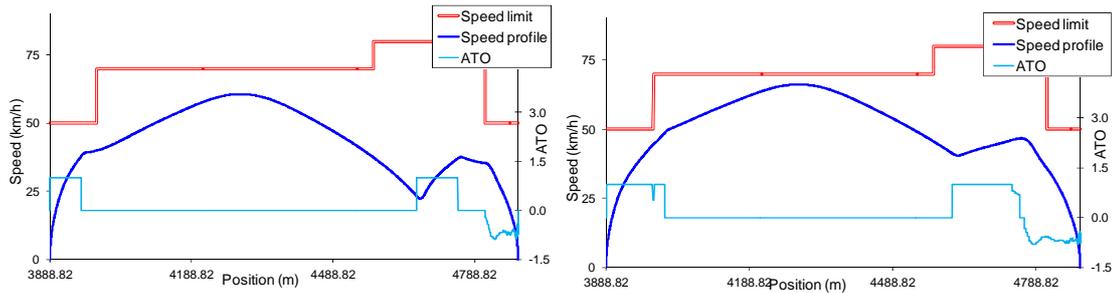


Figura 4.17: Ejemplos de patrones de conducción de la curva de Pareto. Patrón 1 (T-D-RM-D-BS) (izquierda) y patrón 6 (T-D-RM-T-BS) (derecha)

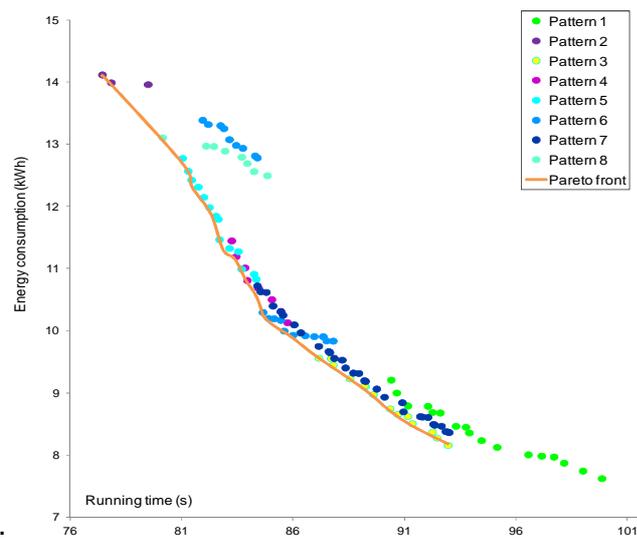


Figura 4.18: Curvas de Pareto de los diferentes patrones de conducción de la Figura 4.15 y envoltura propuesta

4.3.4 Robustez y análisis de sensibilidad

A la hora de escoger las marchas óptimas a implementar es importante estar seguro de que continuarán siendo buenos diseños a pesar de que las condiciones del problema cambien ligeramente. En el caso del recorrido del tren entre dos estaciones la variable que introduce más variación en los valores de energía consumida es la carga de viajeros, que cambia dependiendo de las diferentes estaciones y momentos del día.

Si recuperamos la marcha de la Tabla 4.6 y disminuimos ahora la carga del tren en las simulaciones de marcha, se obtendría un patrón diferente al que habíamos obtenido antes (Figura 4.13). Ahora se obtiene un patrón de tipo *Tracción-Deriva-Remotor-Detención* (T-D-RM-BS) (Figura 4.19). Esto no tendría mayor importancia si

el patrón continuara siendo confortable, sin embargo, como muestra la Figura 4.19, el pequeño periodo de remotor que se produce introduce un “pico” en el perfil de velocidad que convierte la marcha en poco confortable. A la vista de estos resultados se propone realizar un análisis de sensibilidad de las curvas de Pareto obtenidas para cada patrón de conducción, de manera que las soluciones no robustas dejen de ser candidatas a ser implementadas.

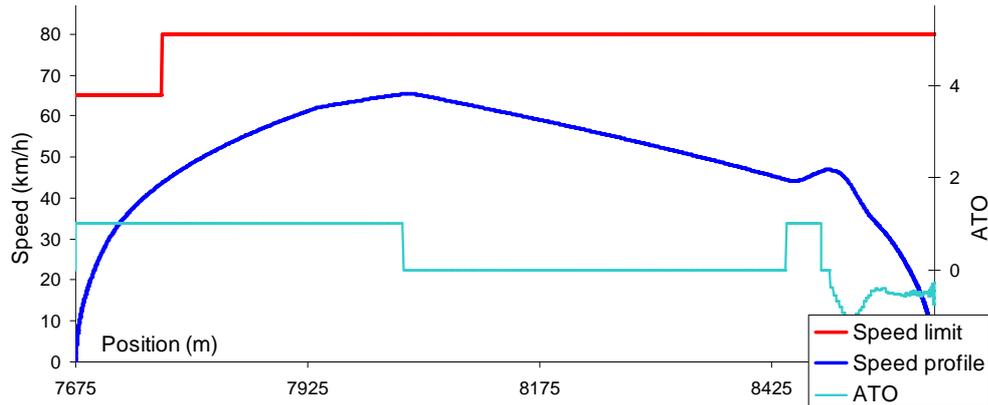


Figura 4.19: Patrón de conducción T-D-RM-BS

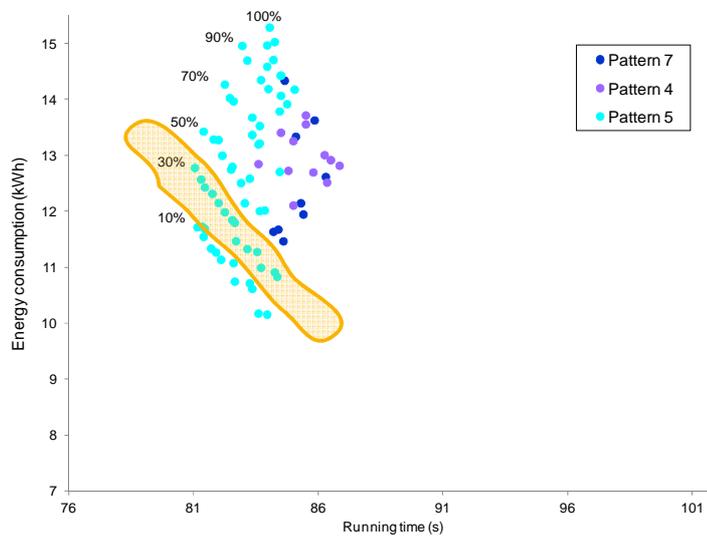


Figura 4.20: Curvas de Pareto, inicialmente de patrón 5, para distintas cargas de viajeros

Las curvas de Pareto de la Figura 4.16 y Figura 4.18 se obtuvieron con una carga del viajeros del 30%. Se ha escogido el patrón de conducción 5 de dichas gráficas, y se han simulado sus marchas para valores del 10%, 50%, 70%, 90% y 100% de la carga máxima. Los resultados se muestran en la Figura 4.20. En ella se ve cómo

algunas marchas de la curva de Pareto son susceptibles de cambiar de patrón de conducción en función de la carga del tren, mientras que otras, las que forman parte de la zona más central de la curva, son más robustas siendo insensibles a cambios en la masa del tren.

El ejemplo se puede apreciar muy bien gráficamente en la Figura 4.21, donde la primera gráfica muestra cómo algunas de las marchas de la curva de Pareto de patrón 5 (círculos amarillos) se sitúan en la frontera de otros patrones de conducción. Si descartamos las marchas no robustas que veíamos en la curva de la Figura 4.20 para su implementación, obtenemos la segunda gráfica de la Figura 4.21, donde se observa que efectivamente las marchas eliminadas correspondían a aquellas próximas a la frontera con otros patrones de conducción.

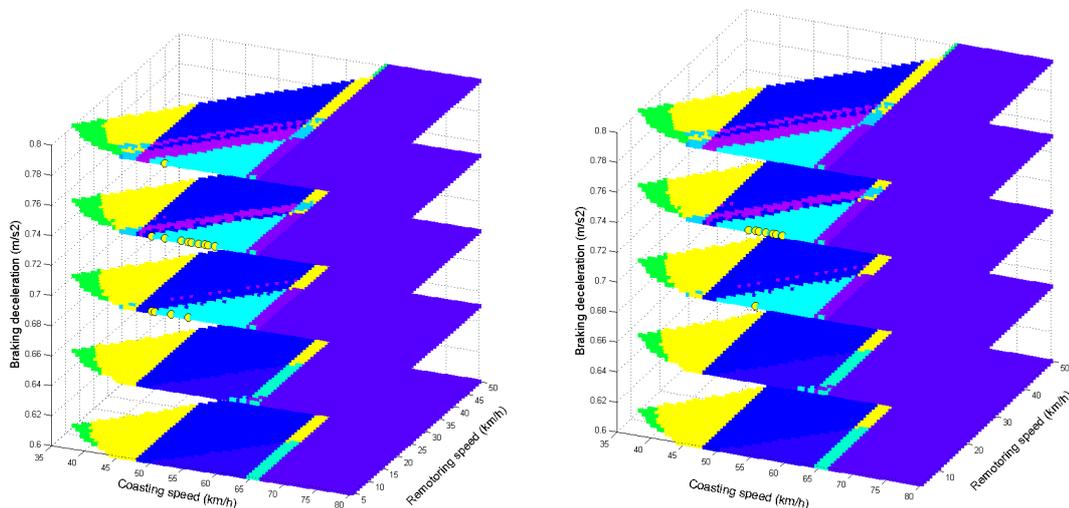


Figura 4.21: Marchas de la curva de Pareto de patrón 5 sobre espacio de soluciones total

Merece la pena destacar la robustez de las marchas resultantes de parámetros de regulación (sin derivas) que no varían su patrón de conducción aunque cambie la masa del tren. Un ejemplo es el patrón 2 (T-B-B-S) de la Figura 4.16 y Figura 4.18 cuyo desplazamiento en el gráfico tiempo - consumo se muestra en la Figura 4.22, permaneciendo sin embargo invariable el patrón de conducción.

A diferencia de los sistemas FBS en los que el diseño que se programa en el regulador de tráfico es único y por lo tanto insensible a la carga de viajeros del tren, los sistemas CBTC sí permiten programar conjuntos de marchas diferentes adaptados a periodos horarios de punta o valle, y por tanto a una carga media de viajeros para cada uno de dichos periodos. Con el procedimiento mostrado el diseñador puede

generar la curva de Pareto inicial con la carga media propia del periodo del día para el que se está realizando el diseño, y definir una variación mínima y máxima de carga que mantenga invariables las marchas de la curva de Pareto.

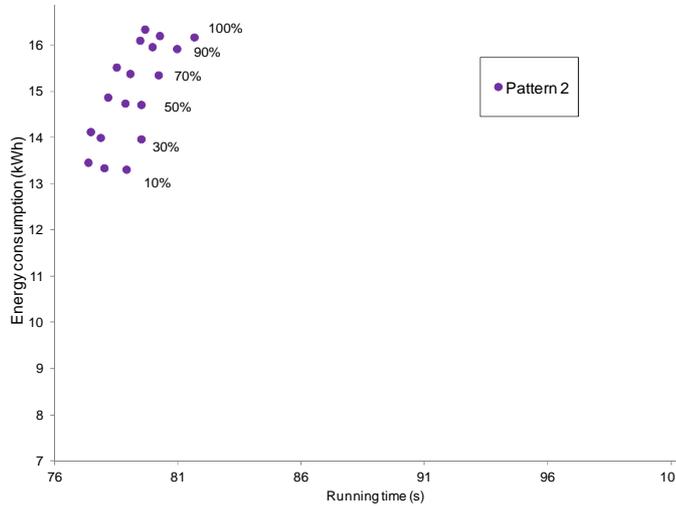


Figura 4.22: Curvas de Pareto de patrón 2 para distintas cargas de viajeros

4.4 Parámetros continuos

Como se ha venido afirmando el sistema CBTC proporciona una mejor comunicación con el tren, facilitando vías de comunicación de mayor ancho de banda que permiten la transmisión de mayor información y por lo tanto de más valores en los parámetros de conducción. De hecho estos parámetros no solamente pueden aumentar su resolución sino que pueden ser en la práctica continuos. Podría enviarse, por ejemplo, cualquier velocidad de deriva de consigna (entre un máximo y un mínimo por restricciones operativas). El siguiente paso ha sido tener en cuenta esa posibilidad en el problema de optimización. Es decir, recuperando la tabla de parámetros de ATO (Tabla 4.2) se trata ahora de ignorar los valores de incremento de cada parámetro y considerarlos continuos (Tabla 4.7), y obtener la curva de Pareto considerando cualquier valor de cada parámetro entre dichos límites. El espacio de soluciones será ahora toda una superficie formada por todas las marchas que se obtienen de la combinación de los parámetros continuos.

	Deceleration (df) (m/s ²)	Speed- holding (rg) (km/h)	Coasting speed (d) (km/h)	Re-motoring speed (rm) (km/h)
Minimum	0.6	30	30	5
Maximum	0.8	80	80	50

Tabla 4.7: Valores máximos y mínimos de los parámetros de ATO considerados

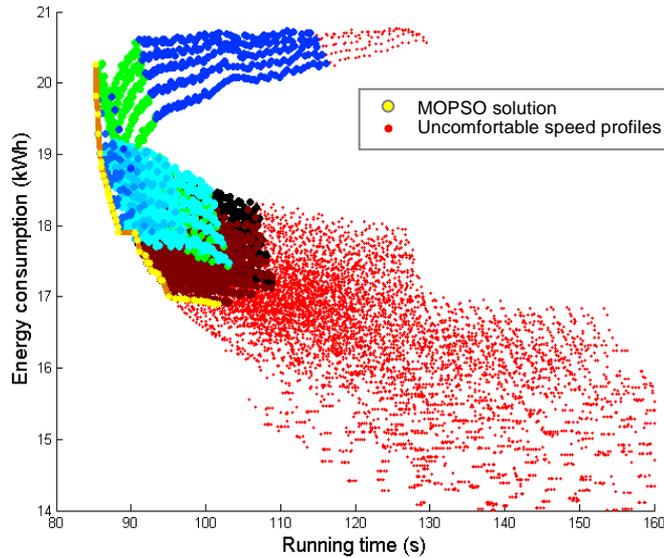


Figura 4.23: Espacio de soluciones de Lavapiés 1 y resultado del MOPSO-CD con parámetros continuos

Se muestra un ejemplo en la Figura 4.23. Como se ve, el algoritmo MOPSO-CD obtiene un ajuste igual de bueno que en los casos anteriores en que se consideraban parámetros discretos. De la misma forma se incluye en el gráfico el espacio de soluciones completo obtenido con simulación exhaustiva. Es importante señalar que no es el espacio de soluciones “continuo”, puesto que se ha obtenido con los mismos parámetros discretos de la Tabla 4.2. Al obtener la curva de Pareto con parámetros discretos era necesario comprobar que no había ninguna solución proporcionada por el algoritmo MOPSO-CD que no existiera en el espacio de soluciones. En este caso se espera lo contrario, ya que el espacio de soluciones es continuo. Los puntos (marchas) que proporciona el algoritmo MOPSO-CD trazan una curva sobre la cual cualquier marcha sería posible de obtener y programar en el sistema de regulación de tráfico.

4.5 Conclusiones

Ya en el Capítulo 2 se había resaltado la importancia de realizar un diseño óptimo de las marchas ATO teniendo en cuenta las restricciones operativas, la calidad del servicio y por supuesto la minimización del consumo de energía. Entonces se consideró el sistema de señalización FBS presente en la mayoría de las líneas metropolitanas, como en Metro de Barcelona, Madrid y Bilbao, y por tanto se basó en la simulación exhaustiva de todas las posibles combinaciones de parámetros de ATO que permiten dichos sistemas.

En el presente capítulo se responde a una nueva necesidad, la de realizar diseños óptimos en nuevas líneas que incorporan señalizaciones de tipo CBTC, que mejoran la comunicación entre el tren y el centro de control. Esto permite un mayor número de valores posibles en los parámetros de ATO, (que puede ser incluso infinito), dando lugar a nuevas marchas que pueden mejorar el consumo de las actuales (hasta un 20% según se ha visto en el ejemplo mostrado), y tener incluso tiempos de recorrido imposibles de conseguir en el espacio de soluciones con señalización FBS.

Este nuevo espacio de soluciones, mucho mayor o incluso continuo, plantea la necesidad de utilizar un algoritmo que evite la búsqueda exhaustiva, y encuentre la curva de Pareto con las soluciones óptimas. Se ha propuesto un algoritmo de computación evolutiva de tipo MOPSO que incluye un mecanismo de *crowding distance* para rellenar huecos en la curva de Pareto considerando las restricciones de confort habituales además de la restricción operativa de velocidad mínima en paso por curva. El algoritmo es eficiente en tiempo de ejecución, y además casi independiente del tamaño del espacio de soluciones. Se han mostrado varios ejemplos que demuestran además el buen funcionamiento del algoritmo respecto a la solución encontrada, utilizando tanto parámetros discretos como continuos, y se ha incluido también un ejemplo de comparación de la nueva curva de Pareto frente al diseño con los parámetros reales FBS mostrando hasta un 11% de ahorro frente a una de las marchas actuales.

Asimismo se ha expuesto la conveniencia de realizar un análisis de las conducciones diferenciando patrones de conducción, obteniendo cada una de sus curvas de Pareto por separado en lugar de la envolvente global. Esta información ayudará al diseñador a la selección final de las marchas a implementar especialmente cuando los tiempos y consumos entre las alternativas estén muy próximos.

Los diseños de marchas que se realizan e implementan habitualmente en FBS son únicos, y se implantan normalmente para ser ejecutados durante todo el día, independientemente de que sea hora punta o valle y por lo tanto, independientemente de la carga que transporte el tren. Los sistemas CBTC permiten programar conjuntos de marchas adaptados a periodos horarios de punta o valle, y por tanto a una carga media de viajeros. Por esta razón, se ha analizado la robustez de las soluciones respecto a la variación de la masa del tren propia del tramo horario de diseño, concluyéndose que es conveniente escoger soluciones de la zona central de cada curva de Pareto. Las marchas que forman parte de los extremos de la curva pueden transformarse en marchas con patrones de conducción diferentes (incluso no confortables) cuando la carga del tren es diferente a la utilizada en el diseño. Se ha propuesto un procedimiento de generación automática de la curva de Pareto robusta, dada la carga media y las variaciones máximas de carga consideradas para el periodo horario de diseño.

4.6 Bibliografía

- ALEXANDER, R. P., MORTLOCK, E. A., HAMILTON, B. A., PARSONS TRANSPORTATION, G. & ASME 2005. Controlling and executing communications based train control (CBTC) installation & testing with a CBTC-ready vehicle. *Proceedings of the 2005 ASME/IEEE Joint Rail Conference: RESEARCH AND TESTING FOR INDUSTRY ADVANCEMENT*, 29.
- ALVAREZ-BENITEZ, J. E., EVERSON, R. M. & FIELDSEND, J. E. 2005. A MOPSO algorithm based exclusively on pareto dominance concepts. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, 3410, 459-473.
- COELLO, C. A. C. & LECHUGA, M. S. MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization. *Evolutionary Computation*, 2002. CEC '02. Proceedings of the 2002 Congress on, 2002 2002. 1051-1056.
- COELLO, C. A. C., PULIDO, G. T. & LECHUGA, M. S. 2004. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, 8, 256-279.
- DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S. & MEYARIVAN, T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6, 182-197.
- DOMÍNGUEZ, M., FERNÁNDEZ, A., CUCALA, A. P. & LUKASZEWICZ, P. 2011. Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225, 463-474.
- GILL, D. C. 1998. The impact of moving block train control on heavy metros. *International Conference On Developments In Mass Transit Systems*, 235-242.
- GILL, D. C. & GOODMAN, C. J. 1992. Computer-Based Optimization Techniques For Mass-Transit Railway Signaling Design. *IEE Proceedings-B Electric Power Applications*, 139, 261-275.
- GONZÁLEZ, F. J. 2005. Introducción a la Señalización Ferroviaria.
- GU, Q., LU, X.-Y. & TANG, T. Energy Saving for Automatic Train Control in Moving Block Signaling System. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Oct 05-07 2011 Campus George Washington Univ (GWU), Washington, DC.
- HO, T. K. & WONG, K. K. 2003. Peak power demand reduction under moving block signalling using an expert system. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 150.
- HUBBS, G. P. & MORTLOCK, E. A. NYCT's communications based train control standard: a look at the leader's system. *Railroad Conference*, 2000. Proceedings of the 2000 ASME/IEEE Joint, 2000 2000. 125-133.
- IEEE 2004. IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements. *IEEE Std 1474.1-2004 (Revision of IEEE Std 1474.1-1999)*.
- JONG-HYUN, R., SUJIN, K. & HONG, W. Pareto front approximation with adaptive weighted sum method in multiobjective simulation optimization. *Simulation Conference (WSC)*, Proceedings of the 2009 Winter, 13-16 Dec. 2009 2009. 623-633.
- KE, B.-R. & CHEN, N. 2007. Optimization of Train-Speed Trajectory of Mass Rapid Transit Systems. *ASME Conference Proceedings*, 2007, 249-253.

- KE, B. R., CHEN, M. C. & LIN, C. L. 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.
- KE, B. R., LIN, C. L. & LAI, C. W. 2011. Optimization of train-speed trajectory and control for mass rapid transit systems. *Control Engineering Practice*, 19, 675-687.
- KENNEDY, J. & EBERHART, R. 1995. Particle swarm optimization. *1995 IEEE International Conference on Neural Networks Proceedings, Vols 1-6, 1942-1948*.
- KENNEDY, J. & EBERHART, R. C. 2001. *Swarm Intelligence*, San Francisco, Morgan Kaufmann.
- KIM, I. & DE WECK, O. 2006. Adaptive weighted sum method for multiobjective optimization: a new method for Pareto front generation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 31, 105-116.
- KNOWLES, J. D. & CORNE, D. W. 2000. Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy. *Evolutionary Computation*, 8, 149-172.
- KUMAR SHUKLA, P. & DEB, K. 2007. On finding multiple Pareto-optimal solutions using classical and evolutionary generating methods. *European Journal of Operational Research*, 181.
- LI, X. D. 2003. A Non-dominated Sorting Particle Swarm Optimizer for multiobjective optimization. *Genetic and Evolutionary Computation - Gecco 2003, Pt I, Proceedings*, 2723, 37-48.
- LIMA M., J. Q. & BARÁN C., B. 2006. Optimización de Enjambre de Partículas aplicada al Problema del Cajero Viajante Bi-objetivo. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 10, 67-76.
- MERELO, J. J. *Técnicas heurísticas de resolución de problemas: computación evolutiva y redes neuronales* [Online]. Universidad de Granada. Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores. Available: <http://geneura.ugr.es/~jmerelo/tutoriales/heuristics101/>.
- MUÑOZ, M. A., LÓPEZ, J. A. & CAICEDO, E. F. 2008. Inteligencia de enjambres: sociedades para la solución de problemas (una revisión). *Ingeniería e Investigación*, 28, 119-130.
- PARSOPOULOS, K. E. & VRAHATIS, M. N. 2002. Particle swarm optimization method in multiobjective problems. *Proceedings of the 2002 ACM symposium on Applied computing*. Madrid, Spain: ACM.
- RAQUEL, C. & NAVAL, P. An effective use of crowding distance in multiobjective particle swarm optimization. *Proceedings of the 2005 conference on Genetic and evolutionary computation*, 2005 Washington DC, USA. ACM, 257-264.
- ROBERT M LEWIS, VIRGINIA TORCZON & TROSSET, M. 2000. *Direct Search Methods: then and now*. Hampton, VA: Institute for Computer Applications in Science and Engineering (ICASE). NASA Langley Research Center.
- RUMSEY, A. F. & GHALY, N. 2004. Re-signalling with communications-based train control - New York City Transit's recipe for success. *Computers in Railway Six*, 15.
- SHI, Y. H. & EBERHART, R. 1998. A modified particle swarm optimizer. *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation - Proceedings*.
- SHUKLA, P., DEB, K. & TIWARI, S. 2005. Comparing Classical Generating Methods with an Evolutionary Multi-objective Optimization Method. *In: COELLO*

COELLO, C., HERNÁNDEZ AGUIRRE, A. & ZITZLER, E. (eds.) *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. Springer Berlin Heidelberg.

YONG, D., YUN, B., FANG-MING, L. & BAO-HUA, M. Simulation Algorithm for Energy-Efficient Train Control under Moving Block System. 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, March 31 2009-April 2 2009 2009. 498-502.

5 Conclusiones, aportaciones y futuros desarrollos

5.1 Conclusiones y aportaciones

La tesis trata de solucionar el problema de la optimización de las marchas de regulación a programar en los sistemas de conducción automática ATO con el objetivo de minimizar el consumo eléctrico, manteniendo o mejorando las condiciones de confort para el pasajero.

Con este fin se ha abordado el modelado en detalle del movimiento del tren y del sistema de conducción automática ATO, de la red de tracción y del tráfico para considerar el aprovechamiento de la energía regenerada en los frenados. También se ha analizado la mejora que supone hacer uso del mayor ancho de banda de comunicaciones que permiten los modernos sistemas de señalización basados en comunicación continua con el tren (sistemas CBTC).

A partir de estos modelos se han definido procedimientos de diseño y algoritmos de optimización basados en simulación detallada del movimiento y consumo del tren, incluyendo una valoración de la energía regenerada para diferentes escenarios de infraestructura eléctrica y tráfico, que han sido aplicados a casos de estudios reales en líneas de Metro de Madrid.

5.1.1 Modelado y diseño de la conducción

Se ha mostrado la necesidad de realizar cálculos precisos de los tiempos de recorrido y de la energía consumida por el tren para obtener un diseño apropiado de las marchas cuando el objetivo final es su implementación en un servicio real. El hecho de ceñirse a la conducción automática del tren mediante equipos ATO incluye restricciones y particularidades que dificultan aún más su modelado, y lo alejan de modelos propuestos en la literatura de enfoque más general. Se trata de una de las aportaciones de la tesis puesto que no se encuentran antecedentes de la reproducción detallada y sin simplificaciones importantes, del movimiento de un tren metropolitano mediante conducción automática, y que en el caso de líneas metropolitanas se hace imprescindible. También lo es el procedimiento de ajuste y validación de los modelos con registros reales.

También se ha puesto especial cuidado en el modelado del rendimiento del tren en función de la velocidad y nivel de tracción puesto que influye en gran medida en el consumo asociado a cada estrategia de conducción, especialmente comparando regulaciones de velocidad (tracción reducida) con ciclos deriva-remotor (tracción máxima en tracción). Tampoco se han encontrado en la literatura modelos de

optimización del diseño de marchas que incluyan un modelo detallado del rendimiento en función de dichos parámetros.

Con todo ello ha sido posible proponer un diseño de marchas óptimo mediante la combinación de todos los parámetros ATO disponibles. En el procedimiento de diseño se han tenido en cuenta, además del tiempo de recorrido y la energía consumida, criterios de confort realistas, así como las velocidades mínimas de paso por curva a respetar para evitar el desgaste excesivo de carril y ruedas, algo no contemplado hasta la fecha. Los resultados muestran que aún teniendo en cuenta estas nuevas condiciones, y sin degradar los tiempos de recorrido e incluso mejorando el confort del viajero, es posible disminuir el consumo significativamente sin necesidad de realizar grandes inversiones.

No se trata de enfoques teóricos únicamente. Los modelos y el procedimiento de diseño se han empleado en la selección de las marchas para los metros de Bilbao, Barcelona y Madrid. En el Capítulo 2 de esta tesis se ha mostrado el caso ejemplo de la Línea 3 de Metro de Madrid puesto que el diseño realizado se encuentra ya en servicio y ha sido posible medir los ahorros conseguidos con él. Se concluye que se obtiene una mejora de aproximadamente el 13% de media en consumo sin afectar a los tiempos de recorrido.

5.1.2 La energía regenerada

Posteriormente se ha querido dar respuesta a una necesidad actual de los sistemas ferroviarios en general, y más en particular en sistemas metropolitanos alimentados en corriente continua, como es la de poder evaluar el uso de la energía regenerada, con el objetivo de lograr maximizar su aprovechamiento tanto en el diseño de marchas ATO como por instalación de dispositivos de almacenamiento e inversión.

De esta manera, ya en el Capítulo 3, se ha pasado de evaluar la energía consumida por el tren en pantógrafo a hacerlo en subestaciones por medio de un modelo de red propuesto, y que constituye una de las principales aportaciones de la tesis. Se han estudiado las distintas posibilidades de aprovechamiento de la energía regenerada mediante la definición de distintos escenarios de red y tráfico, y de dos coeficientes que caracterizan a cada uno de ellos.

Según los resultados obtenidos en el caso estudio presentado, se concluye que aunque es importante poder aprovechar la energía regenerada al máximo, un primer paso necesario es optimizar las marchas ATO puesto que proporcionan ahorros

significativos (6÷11%), y precisan una inversión necesaria muy baja. Se ha comprobado también que la instalación de acumuladores o inversores no sustituye las ventajas energéticas de la conducción económica.

Tras este primer paso se pueden evaluar los ahorros que se obtendrían con posibles inversiones en la red para mejorar el aprovechamiento de la energía regenerada, también dependiendo del escenario de tráfico (hora punta o valle). Se concluye que instalar inversores de potencia en subestaciones, o acumuladores de energía embarcados, en el caso de estudio únicamente proporcionarían ahorros en escenarios de baja densidad de tráfico (5÷6%). Por el contrario no supondrían ningún beneficio en escenarios de mucho tráfico, puesto que la energía regenerada se aprovecha ya, gracias a la transferencia entre trenes.

Más allá de los resultados numéricos obtenidos, la aportación reside en el modelo propuesto de red mediante los coeficientes RC_s y ELC_s que permiten evaluar posibles ahorros de energía en subestaciones, teniendo en cuenta los distintos tipos de tecnología para el aprovechamiento de la energía regenerada.

5.1.3 Diseño de marchas en sistemas CBTC

A pesar de que la mayoría de las líneas metropolitanas cuentan con sistemas de señalización de cantón fijo FBS en la actualidad, no se ha querido obviar las ventajas que proporcionan los modernos sistemas de cantón móvil CBTC en el diseño de marchas.

En la revisión del estado del arte se ha visto cómo prácticamente todos los estudios que tienen en cuenta CBTC, y que se encuentran hasta la fecha, se centran en optimizar la capacidad o la regulación de los trenes con los intervalos de tiempo que permite dicho sistema, o no tienen en cuenta un equipo ATO. Sin embargo, no se encuentran estudios que traten de sacar partido a la gran cantidad de posibles valores de consignas de conducción que permiten enviar estos sistemas al ATO. Quedan fuera de la tesis nuevos modelos de control on-line de la conducción del tren desde el puesto central de regulación de tráfico, aprovechando la comunicación continua con el tren.

Si ya en el Capítulo 2 se había resaltado la importancia de realizar un diseño óptimo de las marchas ATO teniendo en cuenta las restricciones operativas, la calidad del servicio, y por supuesto, la minimización del consumo de energía, en el Capítulo 4 se mostró el importante ahorro de energía que se podría obtener aprovechando el

gran ancho de banda en líneas que incorporan señalizaciones con comunicación continua. Para diseñar las marchas óptimas en este nuevo escenario, se ha propuesto un algoritmo de computación evolutiva para encontrar la curva de Pareto con las conducciones óptimas consumo-tiempo. Gracias a varios ejemplos reales, se ha podido concluir que el algoritmo MOPSO-CD es adecuado para obtener dicha curva de Pareto en tiempos razonables de ejecución, permitiendo incluso introducir las restricciones habituales de confort y operativas.

Como última aportación se ha mostrado también la conveniencia de realizar un análisis de las conducciones diferenciando distintos patrones de conducción, obteniendo cada una de sus curvas de Pareto por separado en lugar de la envolvente global. Además, se ha realizado un análisis de sensibilidad del patrón de marcha respecto a la masa del tren que ha permitido evaluar la robustez de las marchas a implementar, y proponer un procedimiento de generación de la curva de Pareto robusta a variaciones de la carga de viajeros dentro de los márgenes considerados en el periodo temporal punta-valle de aplicación de las marchas.

5.2 Publicaciones

Los trabajos e investigaciones realizados en el contexto de esta tesis doctoral han dado lugar a distintas publicaciones, tanto nacionales como internacionales, que se listan a continuación.

5.2.1 Revistas con índice de impacto

M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, T. Gonsalves, "Multi Objective Particle Swarm Optimization algorithm for the design of efficient ATO speed profiles in metro lines", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. (En revision)

M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, R.R. Pecharromán, "Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. vol. 9, no. 3, pp. 496-504, Julio 2012.

M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, P. Lukaszewicz, "Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy

consumption", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. vol. 225, no. 5, pp. 463-474, Septiembre 2011.

5.2.2 Otras revistas

A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, M. Domínguez, J. M. Ortega, L. Ramos and A. Galarraga (2012). "ATO ecodriving design to minimise energy consumption in Metro de Bilbao". WIT Transactions on The Built Environment. vol 127, pp. 593-601, Septiembre 2012.

M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, J. Blanquer, "Efficient design of ATO speed profiles with on board energy storage devices", WIT Transactions on The Built Environment. vol. 114, pp. 509-520, Septiembre 2010.

M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, L. Pérez-Cayuela, "Computer-aided design of ATO speed commands according to energy consumption criteria", WIT Transactions on The Built Environment. vol. 103, pp. 183-192, Septiembre 2008.

5.2.3 Presentaciones en conferencias

A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, M. Domínguez, J. M. Ortega, L. Ramos and A. Galarraga (2012). "ATO ecodriving design to minimise energy consumption in Metro de Bilbao". 13th International Conference on Design and Operation in Railway Engineering. COMPRAIL 2012. New Forest, UK, 11 - 13 Septiembre 2012

J.M. Ortega, L. Ramos, A. Galarraga, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, M. Domínguez, "Conducción económica en Metro de Bilbao mediante el diseño óptimo de las marchas de conducción automática ATO", VII Congreso de Innovación Ferroviaria. Zaragoza, España, 7-10 Mayo 2012

M. Domínguez, A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, R.R. Pecharromán, J. Blanquer, "Energy efficiency on train control: design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices", 9th World Congress on Railway Research - WCRR 2011. Lille, Francia, 22-26 Mayo 2011

M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, J. Blanquer, "Efficient design of ATO speed profiles with on board energy storage devices", 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, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, L. Pérez-Cayuela, "Simulación de Marchas ATO de trenes metropolitanos", IX Congreso de Ingeniería del Transporte - CIT 2010. ISBN: 978-84-96398-41-2, pp. 66, Madrid, España, 7-9 Julio 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

A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, M. Domínguez, J. Blanquer, "Diseño de marchas ATO de regulación del tráfico que minimicen el consumo de energía", I Congreso Internacional de Tecnología Ferroviaria. ISBN: 978-84-614-2068-1, Zaragoza, España, 12-14 Abril 2010

M. Domínguez, M. Peña, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, J. Blanquer, "Eficiencia energética en la operación del tráfico. Experiencia en Metro de Madrid", BcnRail, Salón Internacional de la Industria Ferroviaria. Barcelona, España, 30 Noviembre-3 Diciembre 2009

A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, M. Domínguez, M. Peña, "Energy efficiency in traffic operation: Spanish experience in Metro de Madrid", Energy Efficiency Days 2009. Tours, Francia, 23-26 Septiembre 2009

M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A.P. Cucala, L. Pérez-Cayuela, "Computer-aided design of ATO speed commands according to energy consumption criteria", 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

A.P. Cucala, A. Fernández-Cardador, M. Domínguez, L. Pérez-Cayuela, "EFIREG: Computer-aided design of energy-efficient ATO speed commands", II Jornadas Estrategias de Ahorro y Eficiencia Energética en el Transporte Ferroviario. Sitges, Barcelona, España, 5-6 Junio 2008

5.3 Sugerencias para futuros desarrollos

A continuación se sugieren futuros desarrollos a esta tesis.

5.3.1 Modelado del tren

En el Capítulo 2 se ha mostrado la importancia del correcto modelado del rendimiento de los motores cuando trabajan en régimen de tracción reducida, es decir, su variación con el porcentaje de esfuerzo solicitado por el ATO y con la velocidad. En la tesis se ha realizado un ajuste experimental a partir de ensayos, que se podría tratar de mejorar a partir de un modelo detallado del sistema de control de tracción del tren, a la vez que permitiría analizar y obtener conclusiones sobre los puntos óptimos de trabajo a utilizar tanto en conducción económica como en conducción manual.

5.3.2 Modelado del equipo ATO FBS

En la tesis se ha realizado un modelado detallado de los equipos ATO de Dimetronic y Bombardier en servicio en Metro de Madrid, Barcelona y Bilbao. Como futuro desarrollo se pueden analizar las características particulares de equipos ATO de otros fabricantes, ya que el procedimiento seguido se considera suficientemente general. De esta forma se podría construir un modelo general de ATO que se pudiera configurar para las características de cada fabricante, y que facilitara su comparación en cuanto a capacidad de ejecutar conducción económica. El objetivo sería proponer mejoras en equipos ATO actuales, o proponer un nuevo modelo optimizado de control del tren en equipos ATO FBS.

5.3.3 Optimización de las inversiones en infraestructura de recuperación de energía

A la hora de realizar el estudio del aprovechamiento de la energía regenerada en función de las distintas estrategias mostradas, se han evaluado las ventajas de unas u otras comparando valores porcentuales de ahorro de energía esperados, utilizando el modelo de valoración de la energía regenerada desarrollado en esta tesis. El siguiente paso sería el desarrollo de modelos que permitan optimizar posibles inversiones en equipamiento para mejorar el aprovechamiento de la energía regenerada, seleccionando el número, la localización, las características y la configuración de acumuladores fijos o inversores de energía a la red de alterna. Sería interesante además incluir en los modelos cifras aproximadas de ahorros económicos equivalentes, y los periodos de amortización necesarios para cada una de las estrategias de inversión.

5.3.4 Nuevo modelo de control eficiente del tren en líneas CBTC

En el Capítulo 4 se ha considerado un sistema de comunicación continuo con el tren dando lugar a un mayor ancho de banda en las comunicaciones y por lo tanto a la posibilidad de enviar un mayor número de parámetros al ATO del tren. El siguiente paso natural sería considerar que esos parámetros se pueden enviar en cualquier momento en el recorrido entre dos estaciones, no solamente en el momento previo a la salida del tren cuando se encuentra parado en una estación. Es decir, en el recorrido entre dos estaciones el tren podría ejecutar distintos parámetros ATO en distintos tramos del trayecto, generando conducciones ATO no consideradas en el modelo actual. Se propone el análisis del nuevo espacio de soluciones resultante en futuros desarrollos y el análisis de sus posibles ventajas.

Por otro lado, la posibilidad de enviar órdenes de control al tren en cualquier momento desde el puesto central de supervisión (ATS) ofrece la posibilidad de integrar en un solo sistema *on-line* la optimización de la conducción y la regulación de tráfico, a diferencia del modelo considerado en esta tesis en el que las marchas se prediseñan *off-line* para ser seleccionadas por el regulador en tiempo real. El reto es importante, debido a la necesidad de coordinar las órdenes a enviar a todos los trenes para que el resultado global sea eficiente tanto desde el punto de vista del tráfico como energético, teniendo en cuenta además las restricciones de tiempo de ejecución de algoritmos de optimización en sistemas de tiempo real.

5.3.5 Mejoras en las herramientas desarrolladas de diseño de marchas

La herramienta desarrollada a partir de los modelos de movimiento de tren y de ATO se ha codificado en lenguaje de programación *Visual Basic for Applications* (VBA) para *Microsoft Excel*. La utilización de este software facilita enormemente el tratamiento de gran cantidad de datos, la comparación de registros tomados en los trenes con simulaciones y la representación gráfica de los resultados. Sin embargo, la constante evolución de *Excel* va en la línea de la mejora de la interfaz gráfica, ralentizando al mismo tiempo la ejecución del código VBA. Es por ello que se propone utilizar otros lenguajes y plataformas como C++ en el entorno de desarrollo *Microsoft Visual Studio*, que permite ejecuciones mucho más rápidas sin perder la posibilidad de realizar interfaces sencillas. Este desarrollo ha sido de hecho ya comenzado en el momento de escribir esta tesis doctoral.

Especial importancia cobra el entorno de desarrollo también en la ejecución del algoritmo MOPSO. Si en la tesis se han mostrado ya grandes ventajas en los tiempos de ejecución a la hora de buscar la curva de Pareto frente a la simulación exhaustiva, es de esperar que las diferencias serán aún mayores ejecutando el algoritmo en otras plataformas.

