

# Análisis y revisión de las marchas en Metro Bilbao (marcha eficiente)

D. José Miguel Ortega

Director de Desarrollo Corporativo

Metro Bilbao



# Índice

1. Eficiencia energética en Metro Bilbao.
  - 1.1. La política de eficiencia energética.
  - 1.2. Balance de consumos energético.
2. Características de la red y del material móvil de Metro Bilbao.
  - 2.1. Características de la red y del sistema de alimentación.
  - 2.2. Características del trazado.
  - 2.3. Parque de Material Móvil.
3. Proceso de modificación de las marchas
  - 3.1. Situación inicial viabilidad del cambio
  - 3.2. Cambios en el período 2011/2012
  - 3.3. Situación actual
  - 3.4. Nuevos cambios
4. Diseño de marcha ATO para Metro Bilbao.
  - 4.1. Modelado
    - 4.1.1 Modelado del tren
    - 4.1.2. ATO
    - 4.1.3. Consumo
    - 4.1.4. Rendimiento
  - 4.2. Precisión del simulador
  - 4.3. Procedimiento de diseño
  - 4.4. Diferentes opciones de implementación
  - 4.5. Ahorros esperados
    - 4.5.1. Parámetros de marcha normal
    - 4.5.2. Parámetros de marcha rápida
5. Resultados.
  - 5.1. Evolución del Módulo de Regulación de Marcha
  - 5.2. Encaje de las marcha eficientes en el actual Módulo de Regulación.
  - 5.3. Efecto de la marcha eficiente sobre el Sistema de Devolución de energía a la Red.
  - 5.4. Previsión de resultados, 2º cambio.
  - 5.5. Ahorros totales por regulación más marcha eficiente.

# 1. Eficiencia energética en Metro Bilbao

## 1.1. La política de eficiencia energética en metro bilbao.

El Octubre de 2010 se pone en operación una nueva Dirección en Metro Bilbao "Desarrollo Corporativo" con diferentes áreas de operación; una de ellas el "Área de eficiencia energética " cuya responsabilidad es:

- Análisis de consumos.
- Detección de «nichos de ahorro» en todas las partidas de consumo de metro bilbao.
- Desarrollo de prototipos y pruebas.
- Validación de los resultados.
- Entregar a las áreas técnicas las propuestas validadas para su implantación.



## 1.2. Balance de consumo energético

Bloques de consumo	Consumo (kWh/año)
Tracción (70%)	53.200.000
Estaciones (30%)	22.800.000
Total (100%):	76.000.000

El 52% de la energía consumida en tracción es regenerada en el proceso de frenado de los trenes, aproximadamente el 40% recuperado antes de las celdas reversibles, por lo que la energía realmente consumida en tracción es aproximadamente:

76.000.000 kWh/año.

## 2. Características de la red y del material móvil de metro Bilbao

### 2.1 . Características de la red y del sistema de alimentación



## Características de suministro:

- ⚡ Número de subestaciones; 10 distribuidas por toda la línea.
- ⚡ Tensión de suministro; 30 kV en 9 subestaciones y 13,2 kV en 1 subestación
- ⚡ Potencia contratadas; 16.990 Kw.

## Los centros de transformación suministran energía a:

- ⚡ Catenaria; 1500 V, CC y feederes de acompañamiento.
- ⚡ Estaciones subterráneas; 380 y 220, CA
- ⚡ Talleres; 380 y 220 CA

## 2.2. Características del trazado

Trazado de Metro Bilbao		
	Mínima	407 m
Distancia interestaciones	Máxima	3.477 m
	Media	1.110 m
	5,992 %	189 m
Rampas máxima	5,470	264 m
	5,465	402 m
Velocidad máxima	80 km/h	
Aceleración transversal NO compensada	0,65 m/s <sup>2</sup>	
Peralte máximo	120 mm	
Rampa de peralte	2,5 mm/m	
Curva radio mínimo en vía general	110 m	

## 2.3. Parque de Material Móvil

### Tipo de UT

Tipo de UT	UT 500	UT 550	UT 600
4 coches	11	13	0
5 coches	13	0	9
Total	24	13	9

### Capacidad

4 coches		5 coches	
Sentados	De pie	Sentados	De pie
112	458	144	574
570		718	



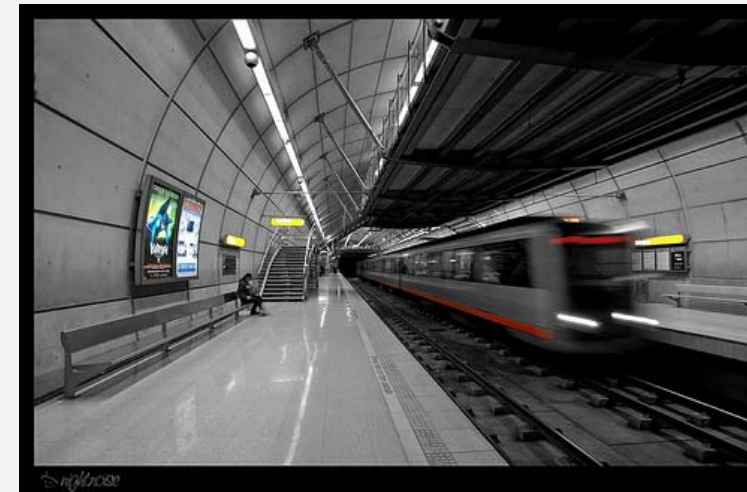
# 3. Proceso de modificación de las marchas

## 3.1. Situación inicial viabilidad del cambio

A principios del 2010 un grupo de trabajo en Metro Bilbao, en base a sus percepciones y cálculos numéricos básicos, recomienda la modificación de la marcha. Se realizan varias pruebas de campo y se concluye en que respecto a la situación inicial:

	Vmax (km/h)	a(m/s <sup>2</sup> )	d(m/s <sup>2</sup> )	jerk(m/s <sup>3</sup> )
Marcha lenta	80	0,8	0,6	0,78
Marcha normal	80	1	1	0,78
Marcha rápida	80	1,2	1,2	0,78

Tiempos de marcha holgados y la marcha más habitual era la "rápida". Se puede realizar un cambio sencillo "ir más despacio".



### 3.2. Cambios período 2011/2012

Primer semestre 2011 Metro Bilbao cuenta a Thales la 1ª modificación del “módulo de regulación” del telemando de tráfico y la Oficina Técnica de Metro Bilbao modifica las marchas de tal forma que la marcha normal (de diseño) se confecciona con parámetros de lenta.



### 3.3. Situación actual y resultados conseguidos

Una vez asentados los cambios anteriormente indicados el resultado conseguido es:

Cambio \ Marcha				(1) Consumo (kwh) Recorrido total dos líneas ida y vuelta
	Rápida	Normal	Lenta	
Antes	58 %	26 %	16 %	1.613,33
Después	21,91 %	15,75 %	62,34 %	1.491,03

(1) Cálculos realizados con la herramienta de simulación desarrollada por la Universidad de Comillas

$$\text{Ahorro \%} = \frac{\text{Consumo 2012}}{\text{Consumo 2011}} = \frac{Q \Delta^{2011}/_{2012}}{Q_{2011}} = 7,6 \%$$

Luego el ahorro conseguido es  $0,076 \times 0,7 \times 76 \text{ Gwh} = 4.043.200 \text{ kwh}$   
Pérdidas en la recuperación por las celdas reversibles  $0,085 Q - (1-0,076) Q = 0,00646 Q$

Ahorro neto descontando la pérdida de eficacia de las celdas:  
 $(0,076 - 0,00646) \times 0,7 \times 76 \text{ Gwh} = 3.699.528 \text{ kwh}$

### 3.4. Nuevos cambios

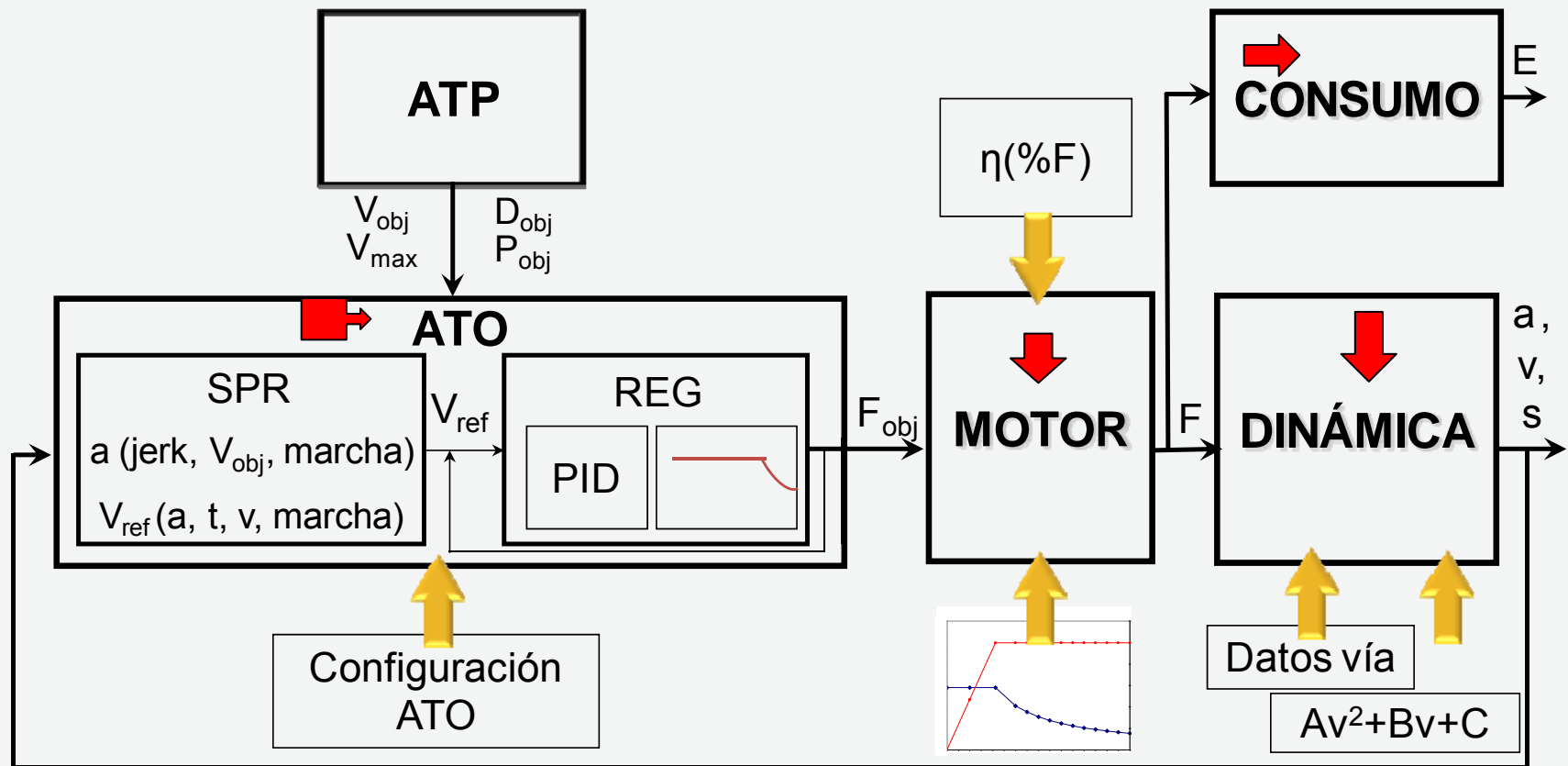
El propio grupo de trabajo, apuntó también que estábamos durante toda la marcha acelerando o frenando con lo cual no utilizábamos los esfuerzos de aceleración durante los períodos de inercia, porque prácticamente no existían. Por lo tanto, había que diseñar una nueva marcha con criterios de eficiencia energética.

Para poder buscar esta marcha en la cual esto se pudiese desarrollar habría que buscar cuál era la marcha más eficiente para el trazado y porqué de Metro Bilbao, lo cual nos llevo a contratar a la Universidad de Comillas el proyecto “Revisión y búsqueda de la marcha eficiente en Metro Bilbao”.

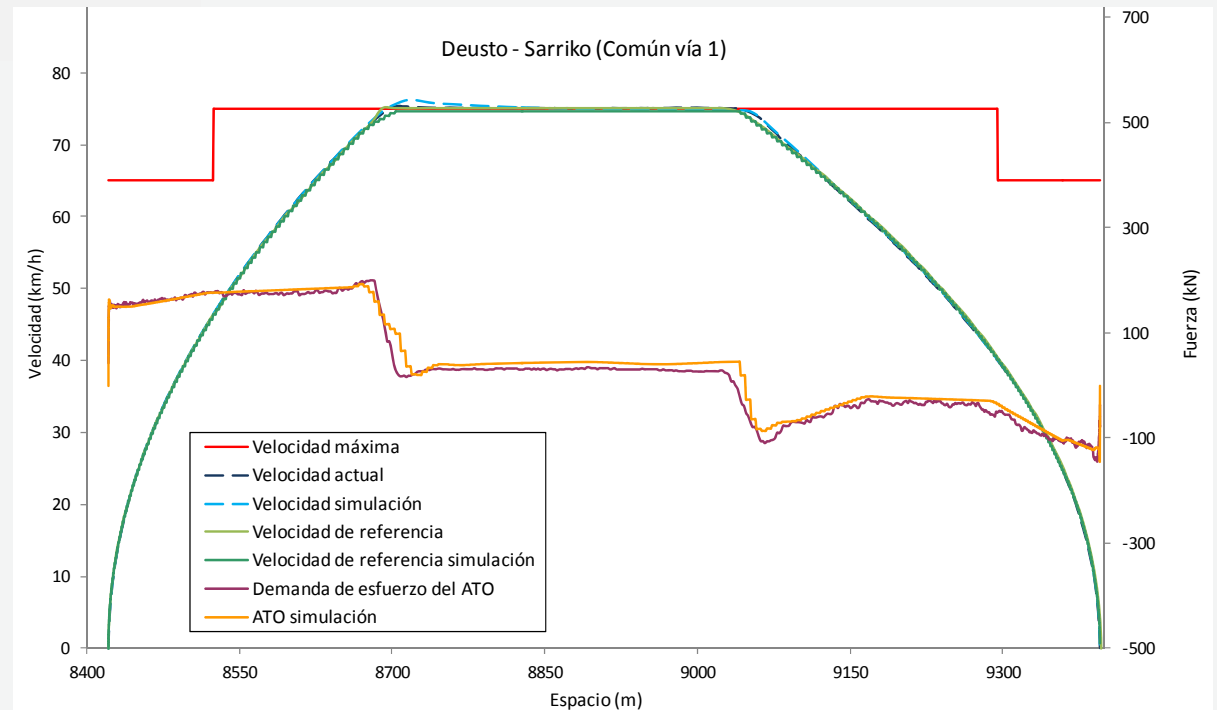
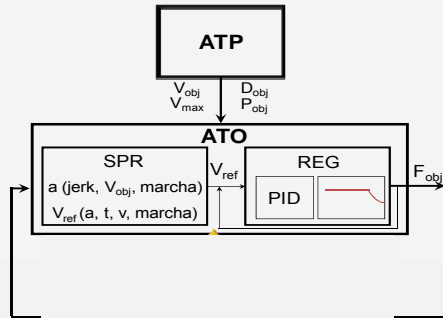
# 4. Diseño de marcha ATO para Metro Bilbao

## 4.1. Modelado del tren utilizado en el simulador

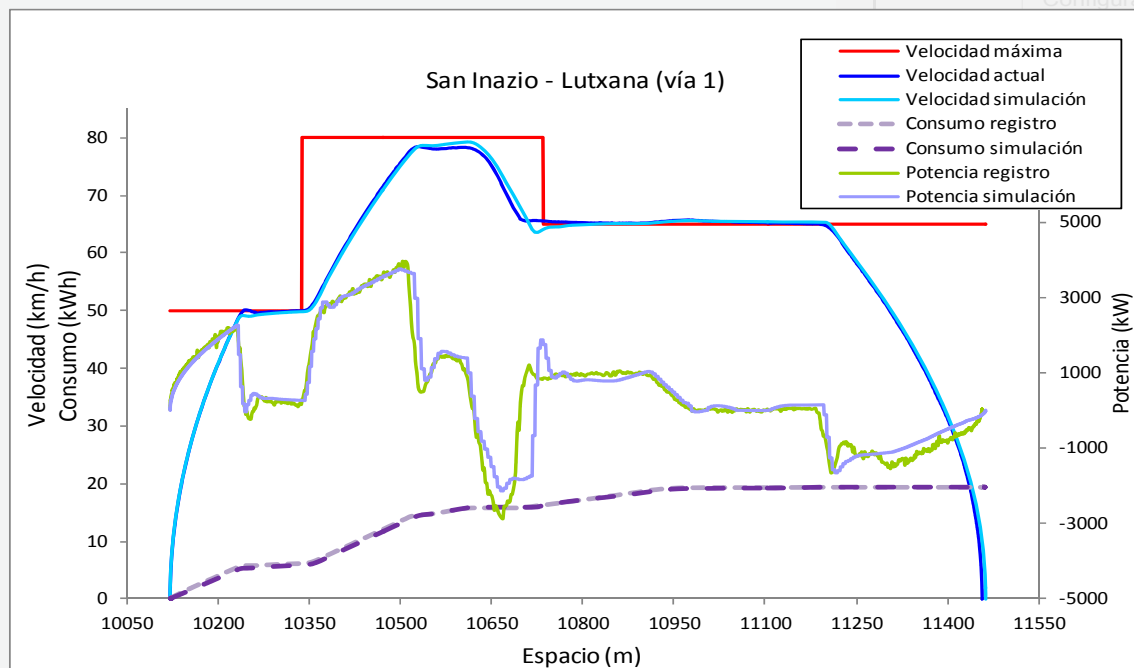
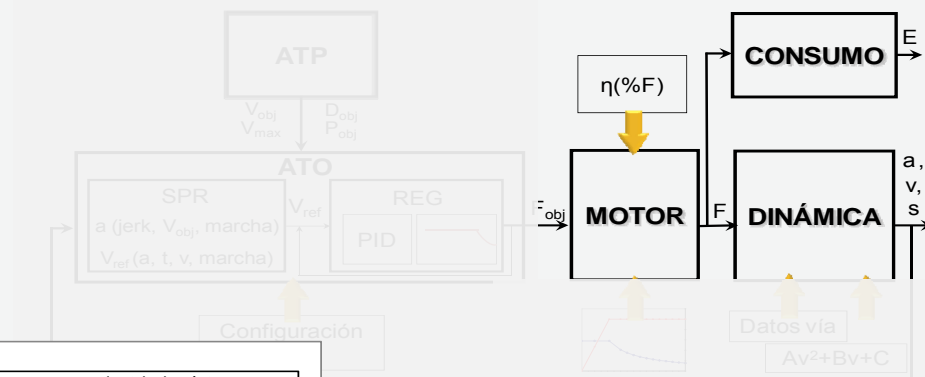
### 4.1.1. Modelado del tren utilizado en el simulador



## 4.1.2. ATO

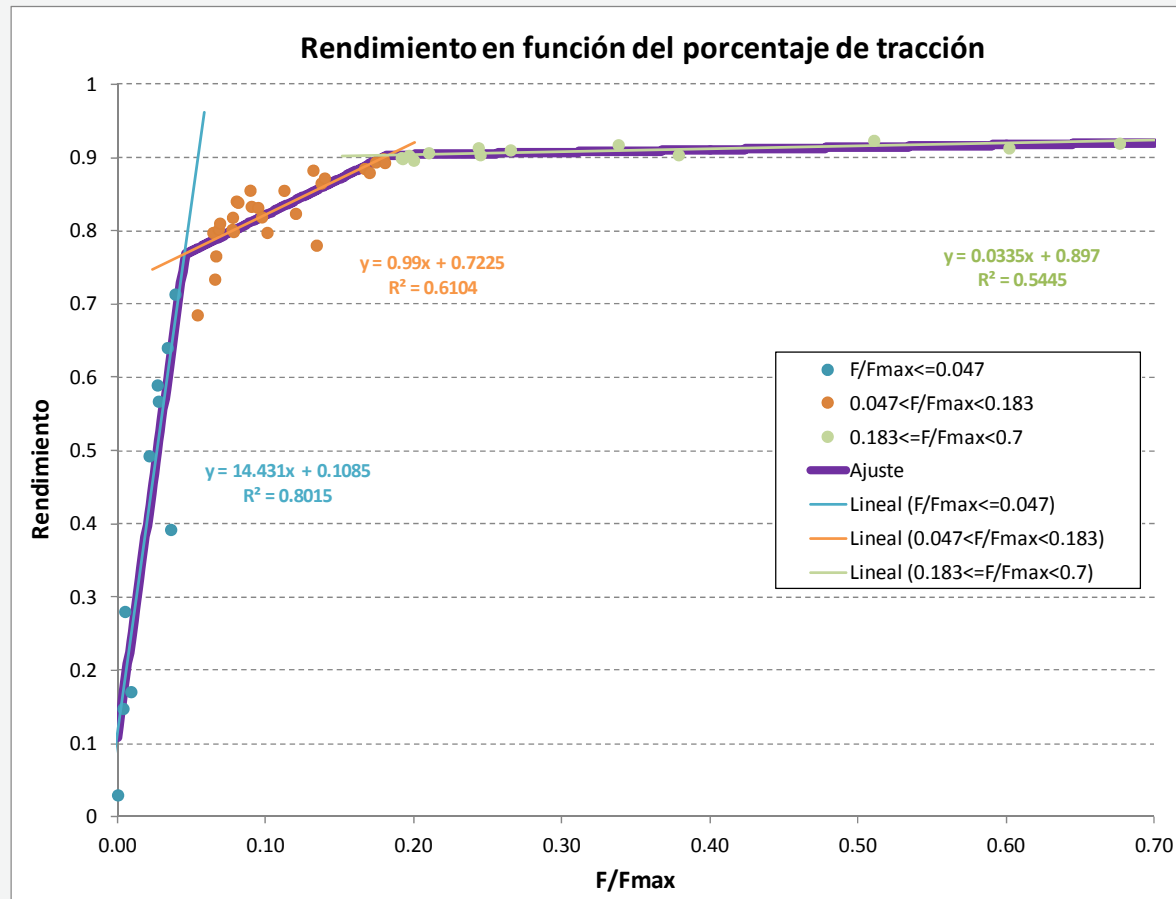


### 4.1.3. Consumo



#### 4.1.4. Rendimiento

El **rendimiento** de los motores depende del porcentaje de tracción aplicado respecto a la fuerza máxima en cada velocidad





## 4.2. Precisión del Simulador

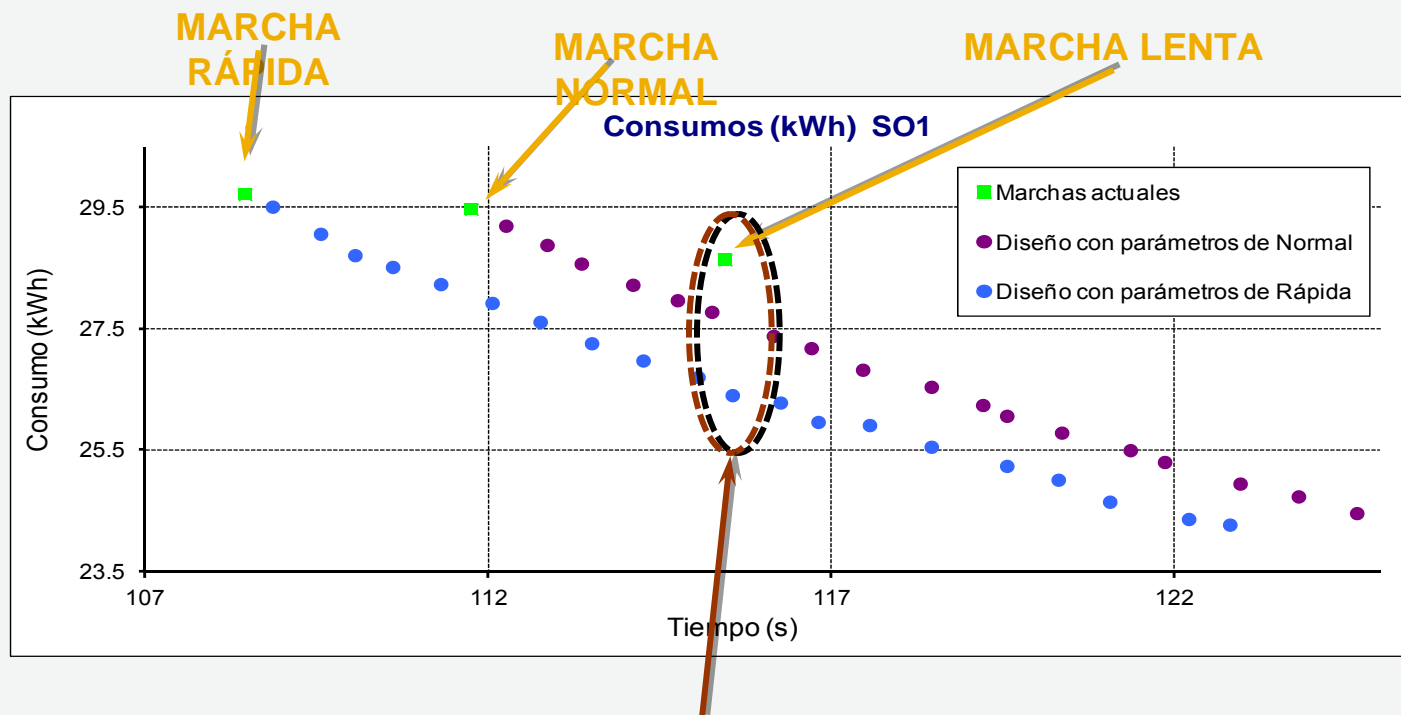
La precisión del simulador respecto a registros, se encuentra en torno a 1.5s de media por interestación en tiempo de recorrido y en un 3.88% en cálculo de consumo.

REGISTRO VS SIMULACIÓN			
Diferencia de tiempo (s)	Diferencia de tiempo (%)	Diferencia de consumo (kWh)	Diferencia de consumo (%)
1.56	2.12	0.59	3.88

### 4.3. Procedimiento de diseño

- ➡ La marcha diseñada podrá tener parámetros de marcha rápida o normal y velocidades máximas, por traza, reducidas.
- ➡ La misma reducción de velocidad se aplicará a todo el recorrido tanto de Línea 1 como de Línea 2.
- ➡ Los tiempos de recorrido de la marcha diseñada se comparan con los tiempos de marcha lenta simulada.
- ➡ Los consumos de la marcha diseñada se comparan, con los consumos de la marcha lenta simulada.

Por **cada interestación** se obtiene un **gráfico tiempo-consumo** en el que se pueden **comparar** las distintas marchas que se obtienen **reduciendo velocidades máximas**, con las marchas rápida, normal y lenta actualmente en servicio.

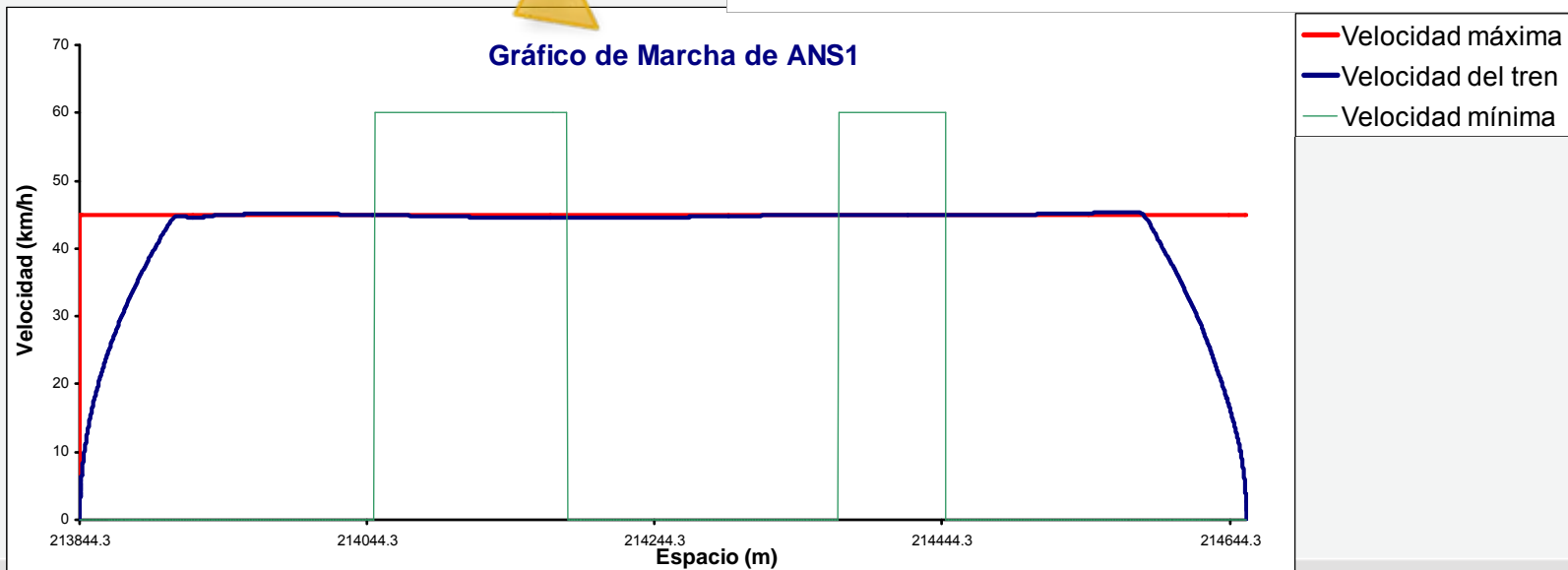
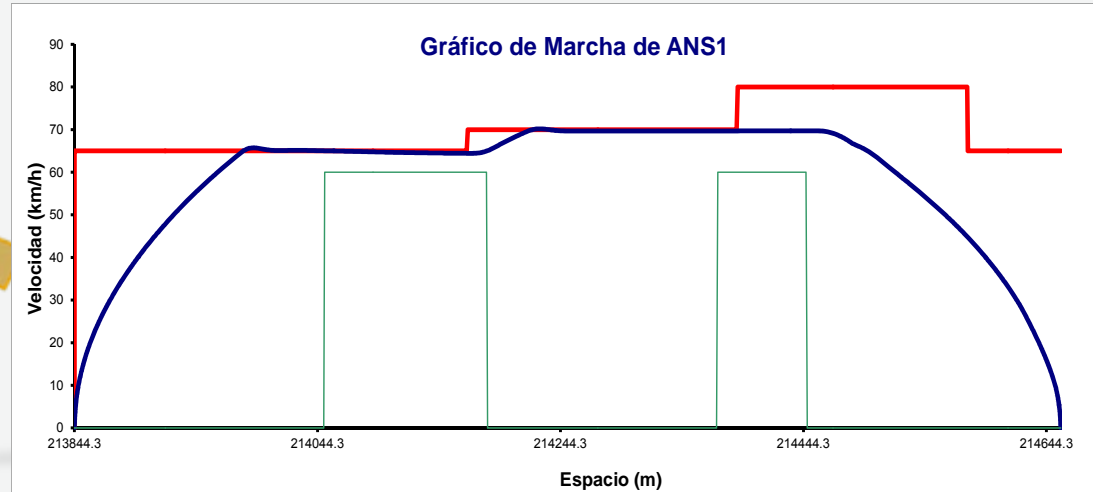


**Aproximadamente mismo tiempo de recorrido con rebaja de 6 km/h y parámetros de normal o 11 km/h y parámetros de rápida**

## Disminución de velocidades máximas

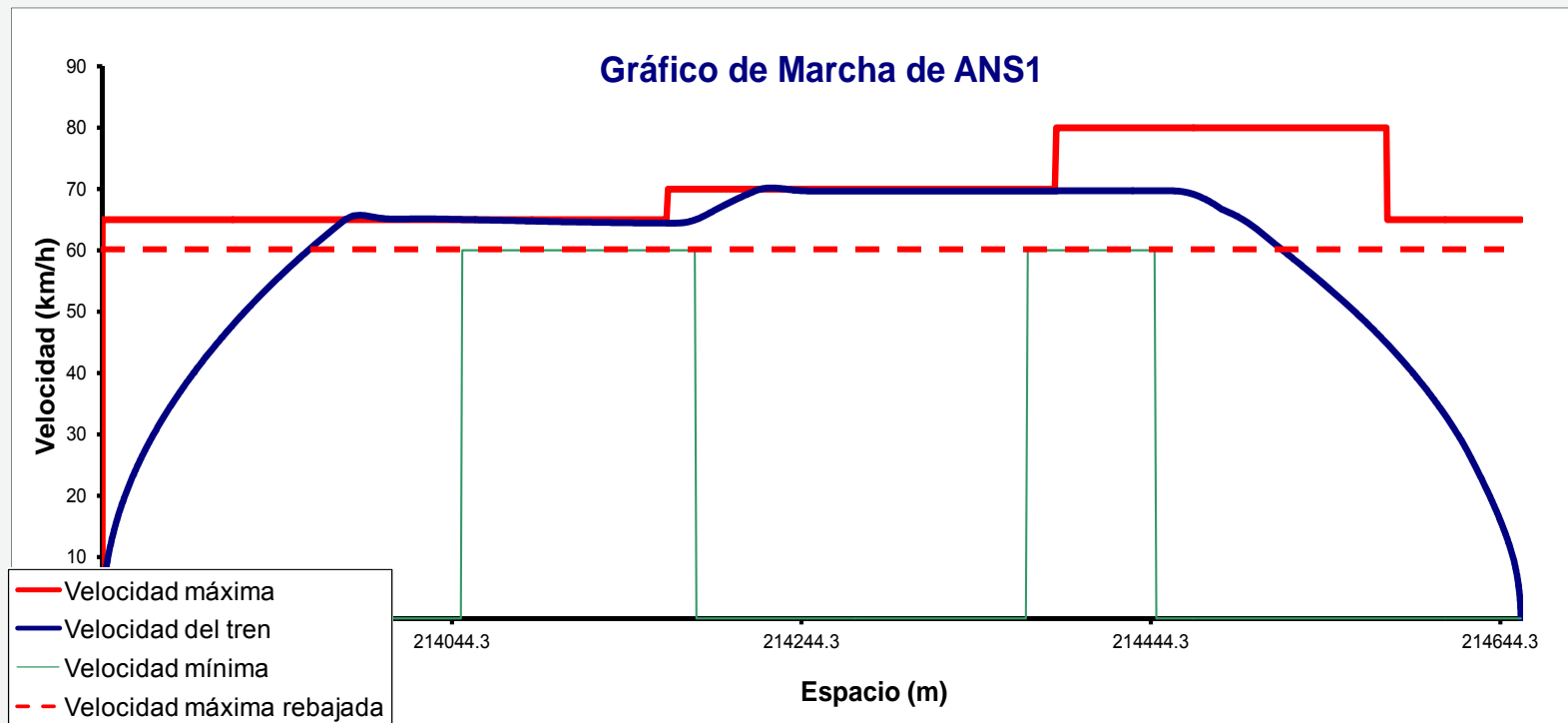
El problema de reducir a 45 km/h

Incumplimiento de velocidades mínimas de paso por curva



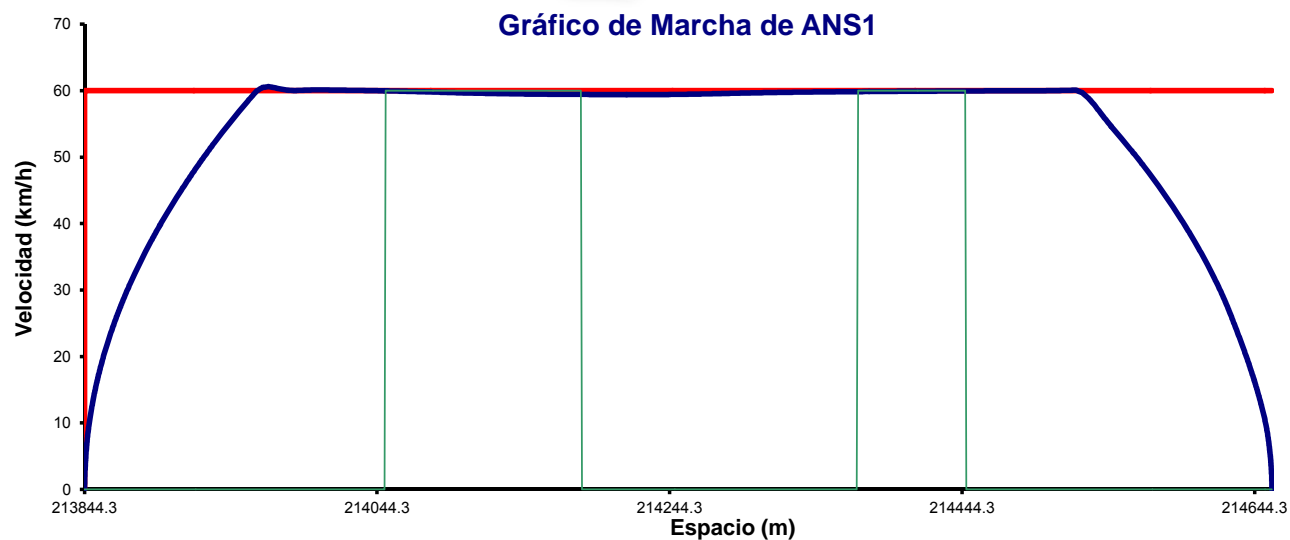
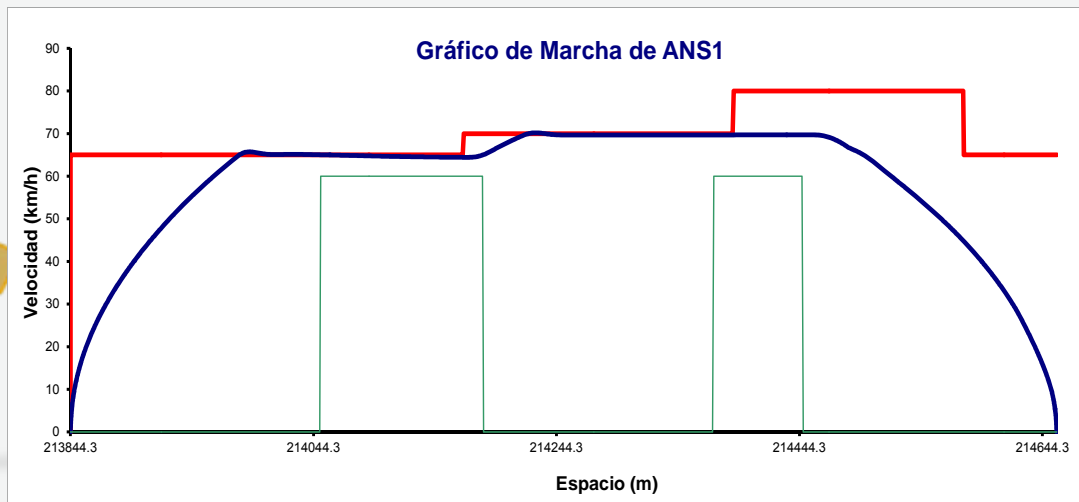
# Disminución de velocidades máximas

Alternativa: reducción de límites mayores de 60 km/h



# Disminución de velocidades máximas

Alternativa: reducción de límites mayores de 60 km/h



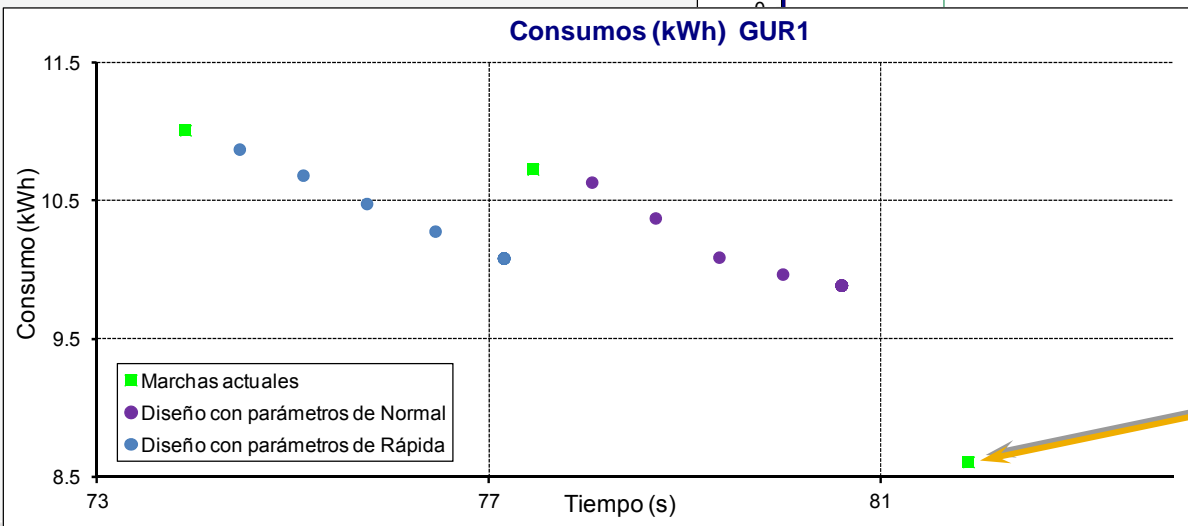
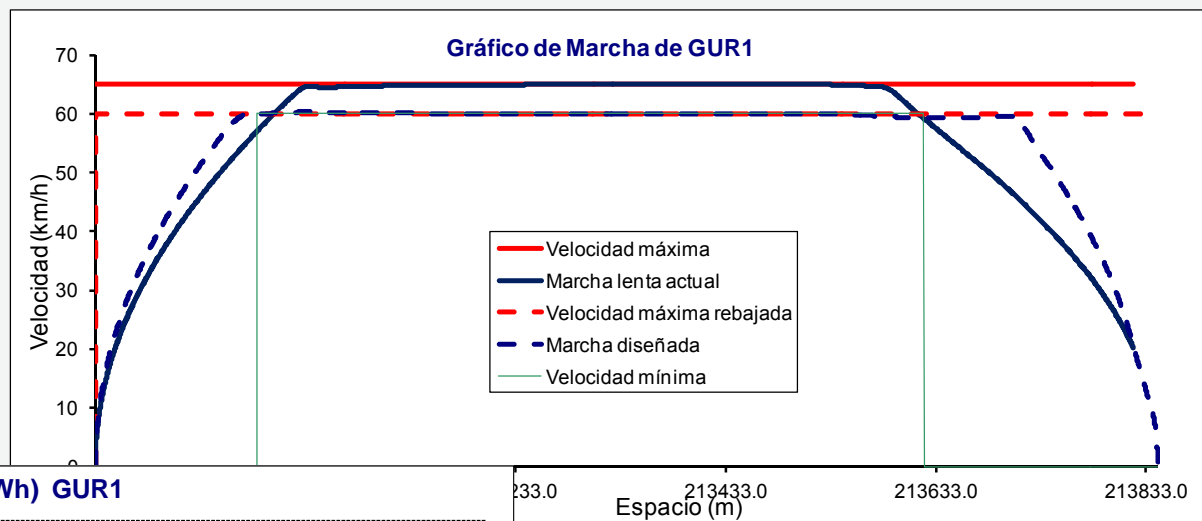
- Velocidad máxima
- Velocidad del tren
- Velocidad mínima

# Disminución de velocidades máximas

Alternativa: reducción de límites mayores de 60 km/h

Problema: aumento de consumo en algunas estaciones

Las marchas diseñadas son **más rápidas** y **consumen** más que la lenta (nominal)

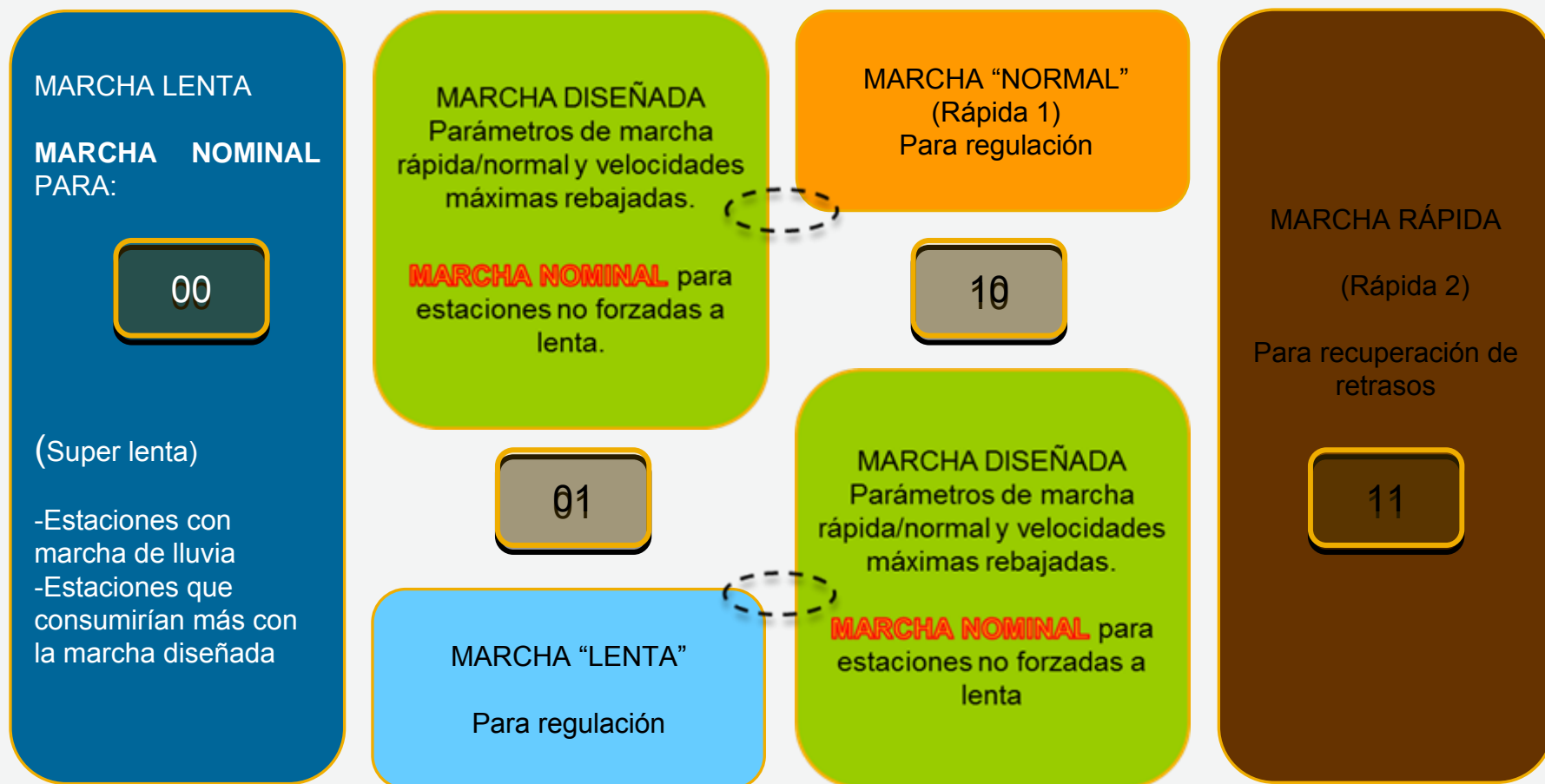


Solución: fijar a marcha lenta (nominal)

MARCHA LENTA

## 4.4. Diferentes opciones de implementación

- Considerando que el sistema actual ATO dispone de dos dígitos libres.
- En función del modelo de regulación a implementar. Intervalo/horario.





## 4.5. Ahorros esperados

### 4.5.1. Parámetros de marcha normal

Disminución de velocidad (km/h)	Ahorro total (kWh)	Ahorro respecto al consumo total (%)	Diferencia de tiempo total (s)	Diferencia tiempo total entre Ariz y Plentzia (Línea 1 Vía 1) (s)	Diferencia tiempo total entre Plentzia y Ariz (Línea 1 Vía 2) (s)	Diferencia tiempo total entre Ariz y Santurtzi (Línea 2 Vía 1) (s)	Diferencia tiempo total entre Santurtzi y Ariz (Línea 2 Vía 2) (s)
5	-1.06	-0.08	-156.45	-46.95	-37.90	-42.50	-29.10
6	9.63	0.75	-143.30	-42.90	-34.50	-39.50	-26.40
7	20.37	1.59	-127.40	-39.05	-29.55	-36.05	-22.75
8	31.16	2.43	-110.50	-34.35	-24.70	-32.70	-18.75
9	43.76	3.41	-94.05	-28.95	-20.60	-29.25	-15.25
10	57.00	4.44	-73.65	-23.10	-15.00	-25.25	-10.30
11	66.54	5.19	-60.90	-19.60	-11.55	-22.40	-7.35
12	75.24	5.86	-45.70	-15.35	-7.75	-18.90	-3.70
13	84.34	6.57	-29.15	-10.35	-3.65	-15.45	0.30
14	92.26	7.19	-12.20	-5.10	0.50	-11.90	4.30
15	101.90	7.94	4.30	-0.30	4.20	-8.00	8.40
16	107.99	8.42	14.05	2.90	6.75	-6.25	10.65
17	113.80	8.87	23.25	6.75	8.15	-4.15	12.50
18	120.35	9.38	35.15	10.90	10.95	-1.90	15.20
19	125.55	9.78	45.95	14.65	13.65	0.20	17.45
20	131.17	10.22	58.40	18.80	17.10	2.20	20.30

## 4.5.2. Parámetros de marcha rápida

Disminución de velocidad (km/h)	Ahorro total (kWh)	Ahorro respecto al consumo total (%)	Diferencia tiempo total entre Ariz y Plentzia (Línea 1 Vía 1) (s)	Diferencia tiempo total entre Plentzia y Ariz (Línea 1 Vía 2) (s)	Diferencia tiempo total entre Ariz y Santurtzi (Línea 2 Vía 1) (s)	Diferencia tiempo total entre Santurtzi y Ariz (Línea 2 Vía 2) (s)
5	-13.74	-1.07	-92.95	-79.55	-75.70	-65.40
6	-2.19	-0.17	-87.85	-75.85	-72.90	-62.20
7	9.96	0.78	-83.65	-71.85	-69.70	-59.10
8	19.51	1.52	-81.00	-67.75	-66.55	-55.70
9	32.07	2.50	-75.65	-63.05	-63.05	-51.75
10	43.82	3.42	-70.30	-58.55	-59.45	-48.60
11	50.83	3.96	-67.10	-54.05	-56.20	-44.60
12	61.23	4.77	-62.55	-50.85	-52.80	-41.40
13	69.35	5.40	-58.60	-46.30	-49.40	-37.15
14	79.19	6.17	-54.05	-42.15	-46.00	-32.90
15	88.10	6.87	-48.55	-39.00	-41.80	-28.95
16	95.07	7.41	-43.55	-36.40	-39.85	-26.70
17	101.26	7.89	-40.15	-34.05	-37.90	-24.45
18	108.31	8.44	-37.10	-31.35	-35.80	-21.75
19	115.32	8.99	-32.30	-28.20	-33.50	-19.05
20	121.17	9.44	-28.70	-25.50	-31.50	-16.60

## 5. Resultados

### 5.1. Evolución en Metro Bilbao del Módulo de Regulación de Marchas

Tipo de marcha	% de utilización	
	2011	2012
Rápida	58	22
Normal	26	16
Lenta	18	62

Ahorro en consumo energético debido al paso de normal a lenta para diseño (2012/2011): 7,6 %

## 5.2. Encaje de las marchas eficientes diseñadas en el actual módulo de regulación

Datos de puntualidad de los 12 últimos meses

Circulación	%	Tipo marcha propuesta	Ahorro respecto a marcha lenta (%)
Tren a la hora	50,5	Lenta (R-20)	9,44
Retaso entre 30 y 120 s	32.,1	Normal (R-15)	6,81
Retraso > 120 s	17,4	Rápida (R)	= Rápida actual

Ahorro

Marcha eficiente / Marcha 2012: 6,64%

### 5.3. Efecto de la marcha eficiente sobre el sistema de devolución de energía a la red

Perdida en celdas reversibles por la implantación de la marcha eficiente.

#### Datos de partida

Ahorro, en energía **contratada**, por celdas reversibles:

8,5 %

Ahorro, en energía **consumida**, por el nuevo “Módulo de Regulación”:

7,6 %

Ahorro, en energía **consumida**, por la implantación de la “marcha eficiente”:

6,64 %

#### Resultado final

Ahorro, en energía **contratada**, por la implantación de la “marcha eficiente”:

6,64 %

La estimación de pérdida mínima de ahorro por la implantación de la “marcha eficiente”:

1,2 %

## 5.4. Previsión de resultados, 2º cambio

Ahorro neto por la implantación de la “Marcha eficiente”	
Ahorro por la implantación de la “Marcha eficiente”:	6,64 %
Disminución de ahorro en celdas reversibles:	0,564%
Ahorro neto:	6,076 %

Ahorro previsible con este 2º cambio  $0,06076 \times 0,7 \times 766 \text{ wh} = 3,232,432 \text{ kwh}$

## 5.5. Ahorros totales por regulación más marcha eficiente

Regulación



3.699.528 Kwh **conseguido**

Marcha eficiente



3.232.432 Kwh **pendiente** de implementación

## Conclusiones

- Metro Bilbao ha desarrollado una cultura basada en:
  - Consume lo **mínimo**.
  - Recupera lo **máximo**.
- Nunca implantamos nada en base a cálculos teóricos (cultura de trabajo con prototipos).
- Estamos convencidos de que la energía más barata es la que hemos comprado hoy, por lo tanto todo lo que invertimos en eficiencia si hoy es rentable mañana será más.
- El proyecto completo supondrá un ahorro de 830.000 €/año.



# Gracias por su atención

## Obrigado

D. José Miguel Ortega  
jmortega@metrobilbao.net

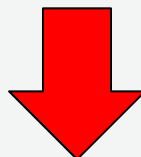
El **módulo ATO** genera las solicitudes de aceleración en cada instante del recorrido con la misma lógica que el equipamiento real, a partir de las mismas variables dinámicas (posición, velocidad), para un juego de variables de conducción concretas (aceleración, deceleración, velocidad de regulación).



El **módulo motor** simula el comportamiento del equipo de tracción, generando esfuerzos de tracción o freno a partir de las solicitudes del ATO.



El **módulo dinámica** realiza el balance de fuerzas en cada instante, considerando las resistencias al avance del tren, gradientes de la vía y la fuerza o freno motor. Proporciona como resultado una aceleración, que lleva al recálculo de la velocidad y la posición en el siguiente ciclo de simulación.



Por último, el **módulo de consumo** calcula en cada instante el trabajo mecánico que realiza el motor, que dividido por el rendimiento del equipo de tracción proporciona la potencia eléctrica en pantógrafo. La integral de esta potencia en cada recorrido calcula el consumo eléctrico de cada marcha.

