

# ETS de Ingeniería Industrial-UPCT

Área de Estadística e Investigación Operativa

Área de Matemática Aplicada

Área de Ingeniería Eléctrica

**RED D  
Y 2050**



## *Respuesta de la Demanda (DR) y Eficiencia Energética*

[\(http://www.demandresponse.eu/\)](http://www.demandresponse.eu/)

[\(http://www.redyd2050-der.eu/\)](http://www.redyd2050-der.eu/)



**Julio 2018**

## ● Un grupo de trabajo multidisciplinar

- Formado en 2006 con profesores de la UPCT y de la UMH (Elche), y otros colaboradores.

- Proyectos desarrollados: 5 desde 2007 (Plan Nacional) siempre en colaboración/coordinación

- **ENE2016-78509-C3-2-P (DESIDERATUM)** «Desarrollo de la respuesta agregada de la demanda mediante modelos imbricados: aplicación en los sectores residenciales y comerciales».

- **ENE2015-70032-REDT (REDYD-2050)** "Red Temática en Recursos Energéticos Distribuidos y de Demanda para el Desarrollo del Horizonte Energético 2050".

- **ENE2013-48574-C2-2-P (REDESCO)** «Herramientas de análisis para la evaluación y gestión de la participación de la respuesta de la demanda en la provisión de Servicios Complementarios en S. Eléctricos».

- **ENE2010-20495-C02-02.** «Herramientas y políticas eficientes de respuesta de la demanda en mercados eléctricos»

- **ENE2007-67771-C02-02/CON.** «Desarrollo de herramientas avanzadas de agregación, evaluación, gestión y simulación de Recursos Energéticos Distribuidos y de Demanda en mercados eléctricos liberalizados»

- ≈ 680 citas en 570 publicaciones internacionales



## ● Colaboración con otras universidades

- La colaboración con otros grupos expertos es fundamental. DR es un problema es de gran complejidad
- Creación de una plataforma para nuevas convocatorias I+D+i



Universidad  
Carlos III de Madrid



UNIVERSIDADE  
DE VIGO



ETSII-UPCT



1542

Universidad  
Zaragoza

POLITÉCNICA

- **Eficiencia Energética y Almacenamiento de Energía (ESS) en el Transporte por Ferrocarril**



## Antecedentes

### ● Eficiencia energética en FFCC

- Dos proyectos fin de carrera (2008 y 2015)
- Dos presentaciones en congreso CIRED (2009 y 2011)

### ● Motivación del inicio de la investigación

- Mejora de un sector con potencial importante (23% CO<sub>2</sub>)
  - Por consumo de energía (2,1%), emisiones (3,6% del sector)
- Tradición de locomotoras diesel-eléctricas en España
- Escasa utilización del FFCC en transporte de mercancías (el contraejemplo de Alemania)
  - DB Schenker (North Rail Express Freight, 95% capacidad)
- Trayectos parcialmente electrificados (Madrid-Cartagena)





## ● No es un problema nuevo en el ferrocarril

● Alemania: «ETA» (OESS con almacenamiento total, 1930-60)

● No parece la mejor opción (peso, fiabilidad,...)



● Japón: 1912/18: SESS “Battery post” Shinestsu 624V/1332Ah

● Sistemas eléctricos con poca fiabilidad y alto tráfico

● Otros ejemplos actuales: Keihin (volantes de inercia), Shin-Hikida, Nagoya y Kobe (Li-ion); Seibu Railway (EDLC, SC); Osaka (NiMH)

● EEUU y UK: volantes de inercia en metros (300kW a 1MW)

## ● La mejora del FFCC pasa por la adopción de nuevas tecnologías y la búsqueda de oportunidades

### ● Consumo de energía del FFCC (2017)

- 70% Tracción
- Pero un 30% en otros servicios

### ● Necesidad de potencia en un tren: si los comparamos son rangos de potencias que permiten la participación en mercados eléctricos ► oportunidades para el “consumidor” u operadora

- De 20-24MW en alta velocidad a 1MW en unidades EMU y DMU

### ● Posibilidades de ahorro con almacenamiento de energía

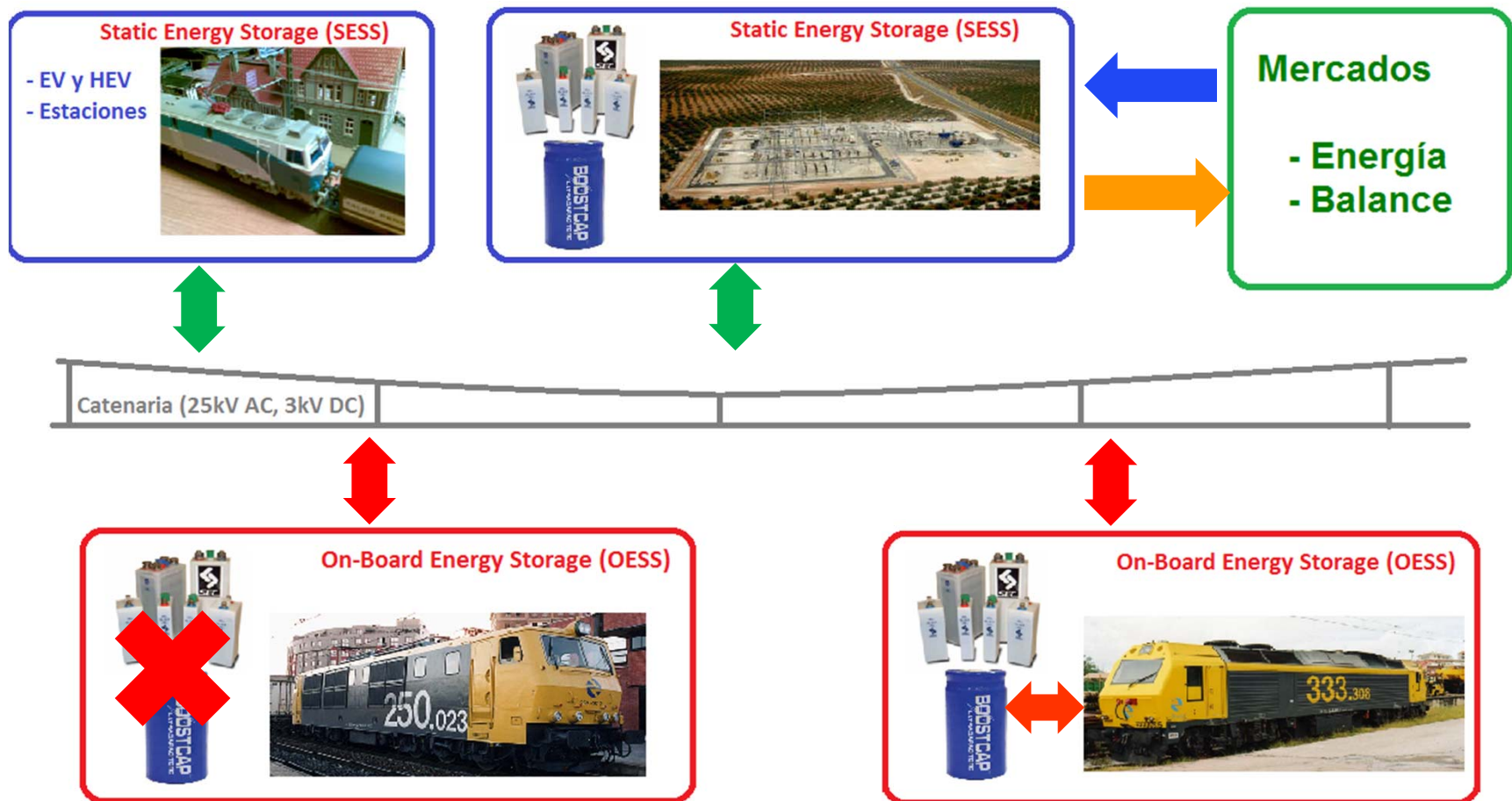
- Alemania: S-Condensadores en tranvías 30% ahorro (2007)
- Alemania: S-Condensadores en DMU, 44% ahorro en fuel (2004)
- Japón: S-Condensadores, SESS, 77% de la energía de frenada
- Italia: S-Condensadores, Subestación, reducción de costes en refrigeración en metro
- Corea y España: volantes de inercia, SESS, 36% reducción picos

### ● Operación óptima de trenes: gestión del consumidor ( $\approx$ DR)



## ● Posibles escenarios para sistemas ESS

Escenario	1	2	3	3bis
Energía	80-100MJ	150MJ	100M-1GJ (OESS)	1300MJ
Ahorro	4-16	14.8	38	25 (mercados)





## ● Escenario 1: almacenamiento de energía On-board de la frenada regenerativa (OESS)

- Locomotoras diesel-eléctricas e híbridas.
- Aprovechamiento de las frenadas, aumento de la fiabilidad, reducción de la potencia (y peso)

### Static Energy Storage (SESS)

- EV y HEV
- Estaciones



### Static Energy Storage (SESS)



### Electricity Markets

- Energía
- Serv. Complem

Catenaria (25kV AC, 3kV DC)

### On-Board Energy Storage (OESS)



### On-Board Energy Storage (OESS)



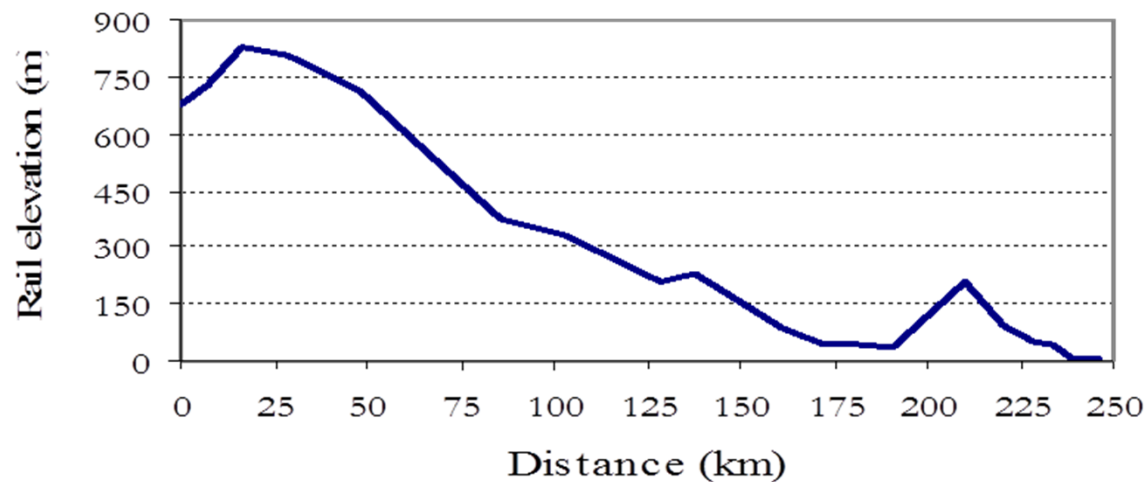
## ● Primer estudio: 2007/2009 (I)

- Algunos «Altaria» Madrid-Cartagena propulsados por las series 333, y en otras zonas por las 319 reformadas.



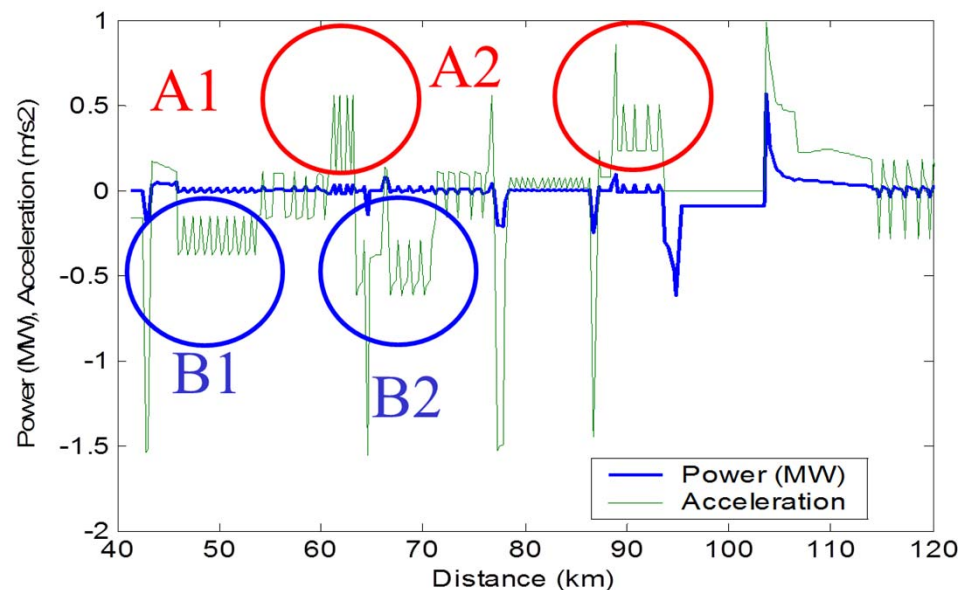
## ● Trayecto a estudio

- Albacete-Cartagena (250 km)



## ● Primer estudio: 2007/2009 (II)

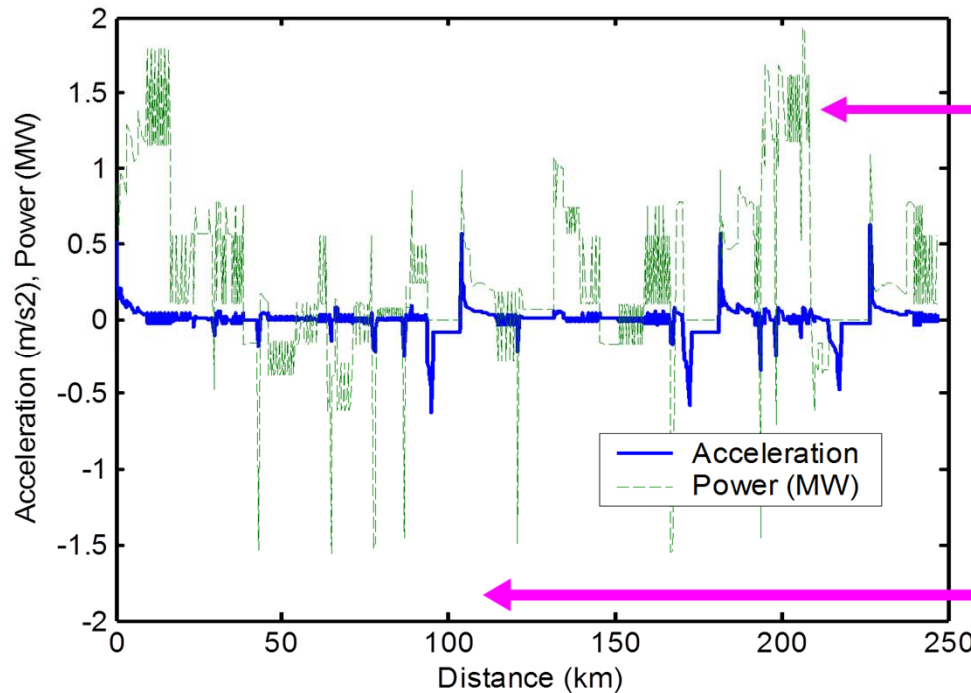
- Almacenamiento simple: la energía del frenado dinámico (B) se almacena para un uso posterior (A): tamaño 80-100MJ
- Simulador propio: Matlab + fuentes bibliográficas
  - ADIF (Perfiles de vía, mallas), Traction Electrique (Kader/Allemberg), Railroad Engineering (Hay), Alsthom



- La potencia media 0,3MW, mediana 0,5MW ► usar locomotoras S-319GM de 1.3MW + ESS de más capacidad (500-600MJ)



## ● Primer estudio (II)



$P$  (max): 1.8MW

$P$  (avg): 0.3MW

Braking losses (in R) up to 1.5MW



**En. Recovery!**  
**(regenerative)**

## ● Baterías frente a Supercondensadores (SC)

Itinerary	Gains in efficiency with SC (%)	Gains in efficiency with batteries (%)
Albacete-Cartagena	16,4%	12,26%
Cartagena-Albacete	4,04%	3,02%





## ● Escenario 2: gestión del tráfico y energía

- Coexisten locomotoras con y sin almacenamiento OESS
- Las subestaciones pueden sufrir sobrecargas y bajadas de niveles de tensión (retrasos de trenes, imposibilidad de gestionar el tráfico de mercancías,...)
- Es decir, el «cliente» tiene generación distribuida variable (OESS), interesante para el operador de infraestructura

### Static Energy Storage (SESS)

- EV y HEV
- Estaciones



### Static Energy Storage (SESS)



### Electricity Markets

- Energía
- Serv. Complem

Catenaria (25kV AC, 3kV DC)

### On-Board Energy Storage (OESS)



### On-Board Energy Storage (OESS)



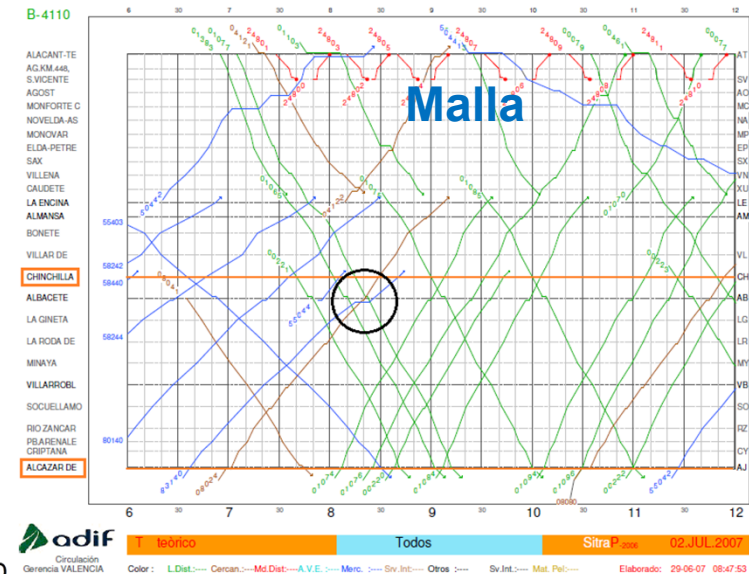
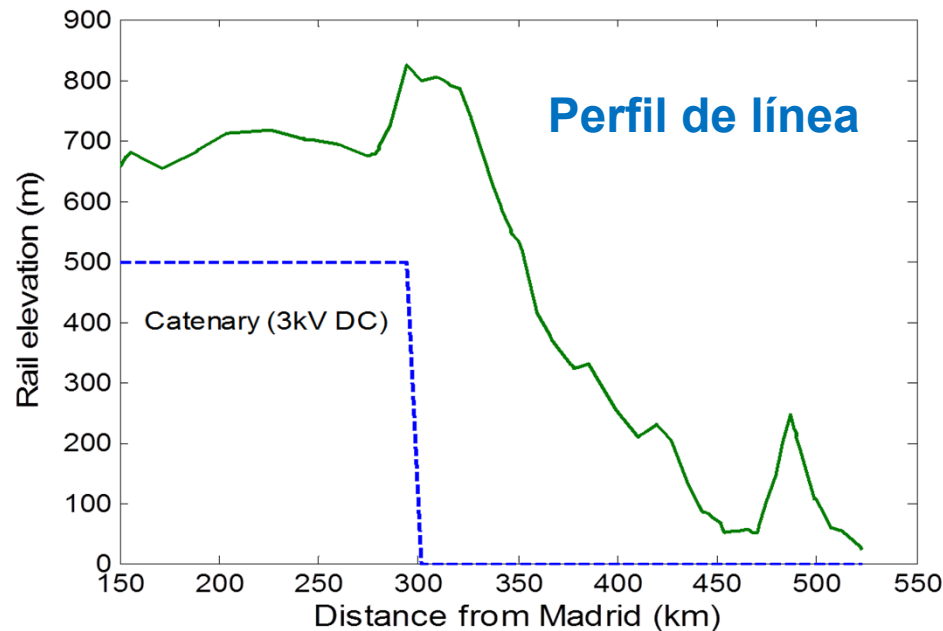
## ● Segundo escenario

- Posibilidades de una «supuesta» diesel híbrida (pasajeros) que intercambia energía con una eléctrica (mercancías/pasajeros)



- Locomotora diesel S333 (licencia General Motors), características:
  - Peso: 100-120 t; Potencia: 2237 kW (UIC)
  - Maximo esfuerzo de tracción (20km/h): 320kN
  - Velocidad máxima: 146 km/h a 200km/h (subseries 333 y 334).
  - Traccionando composición Talgo IV: 118 t (9 coches)
- Locomotora eléctrica S250
  - Peso 123t; Potencia: 4600 kW
  - Esfuerzo de tracción: 256/410kN

## ● Trayecto a estudiar: Alcázar- Chinchilla-Cartagena



### ● Escenario 1: la diesel almacena la E<sup>a</sup> del frenado regenerativo

● Capacidad 105MJ. Es f(paradas, pendientes, curvas,...)

### ● Escenario 2:

● La diesel aprovecha la energía que no pueden absorber la subestación u otras unidades por el frenado de locomotoras.

● La diesel apoya el arranque/aceleración de unidades eléctricas



## ● Resultados

### ● Escenario 1 (locomotora S-333)

Itinerary	Demand (GJ)	Storage (GJ)	Efficiency (%)
Alcazar to Chinchilla*	2.99	0	8.4
Chinchilla to Cartagena	2.34	0.59	
Cartagena to Chinchilla	6.08	0.27	4,6
Chinchilla to Alcazar *	2.14	0.11	

### ● Escenario 2 (locomotoras S-333 y S-250 en apoyo mútuo)

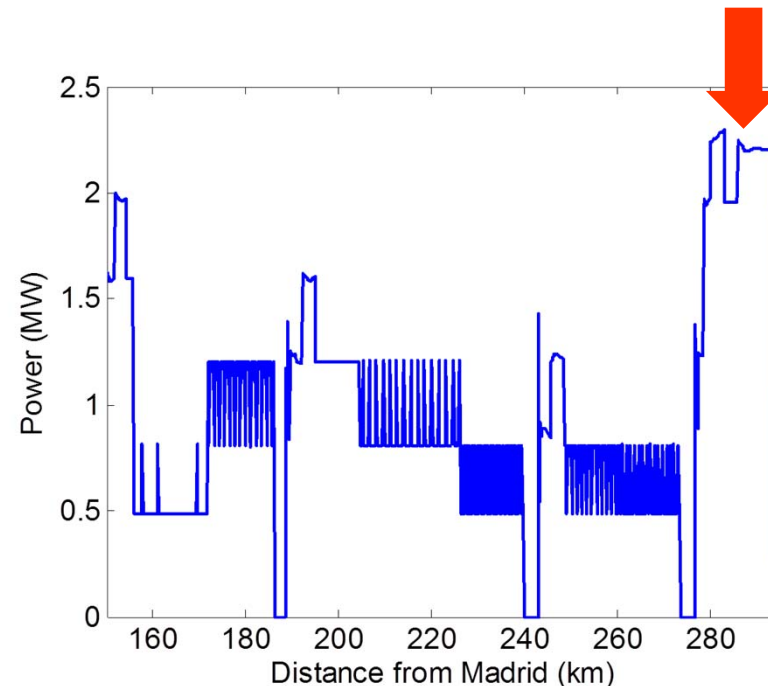
Locomotive	S-250	S-333	S-250&S-333
Energy (GJ)	5	2.99	5+2.99
Storage (GJ)	0	0	0.15
Res. Braking (GJ)	0.54	0	0
Reg. Braking (GJ)	0	0	0.15+0.39
<b>? Efficiency (%)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>14.8</b>





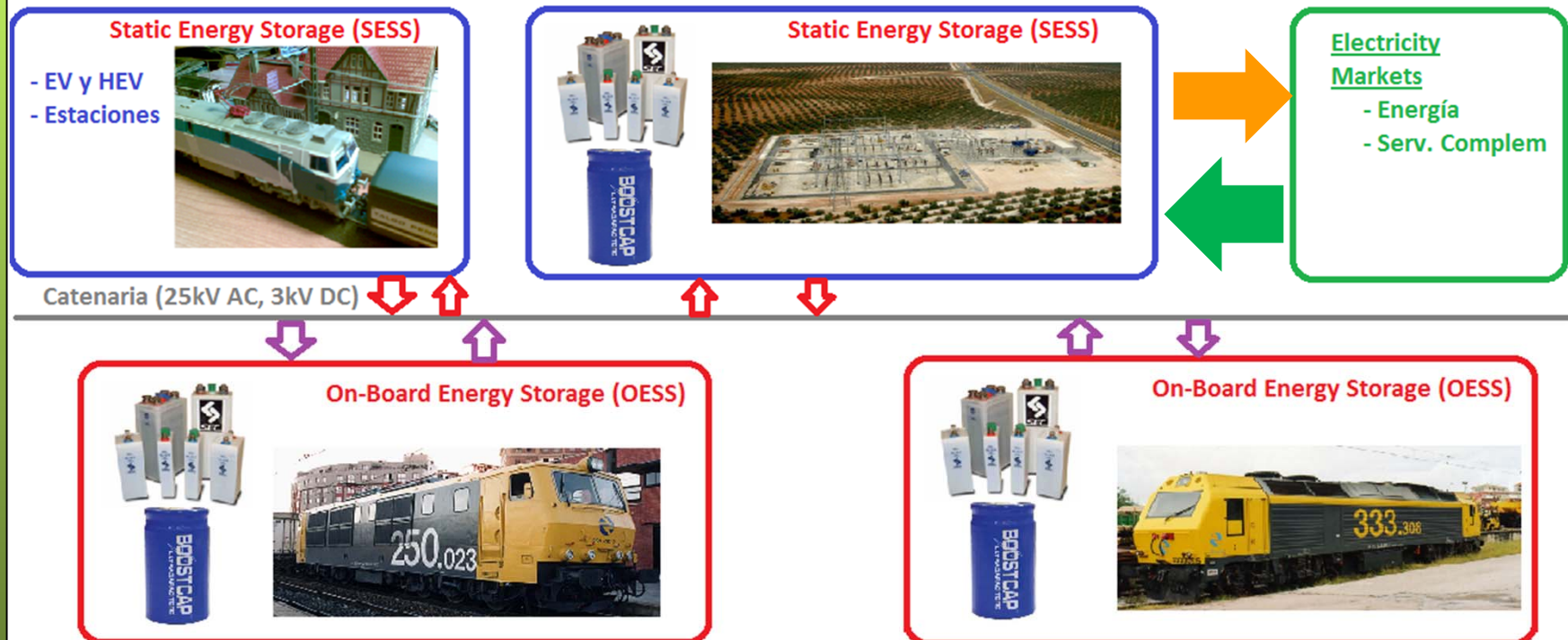
## ● Un beneficio adicional: sobrecarga de subestaciones

- La mayoría de las subestaciones DC tienen rectificadores y no pueden devolver energía del frenado a red.
- En nuestro ejemplo Chinchilla-Albacete
  - Subestación 1 (Chinchilla): 6MW, 66/3kV
  - Con el consumo simulado admite 3 trenes (y cantones de vía)
  - Con la gestión de energía almacenada ▼ 40% pico de potencia
  - Coste: 750k€, ahorro 80k€/año en fuel



## ● Escenario 3: Almacenamiento en subestación y posibilidad de gestión de E<sup>a</sup> en la red/mercados

- El consumo de potencia de la locomotora es básico
- Y conocer la situación del tren (malla del trayecto y posición de las subestaciones)

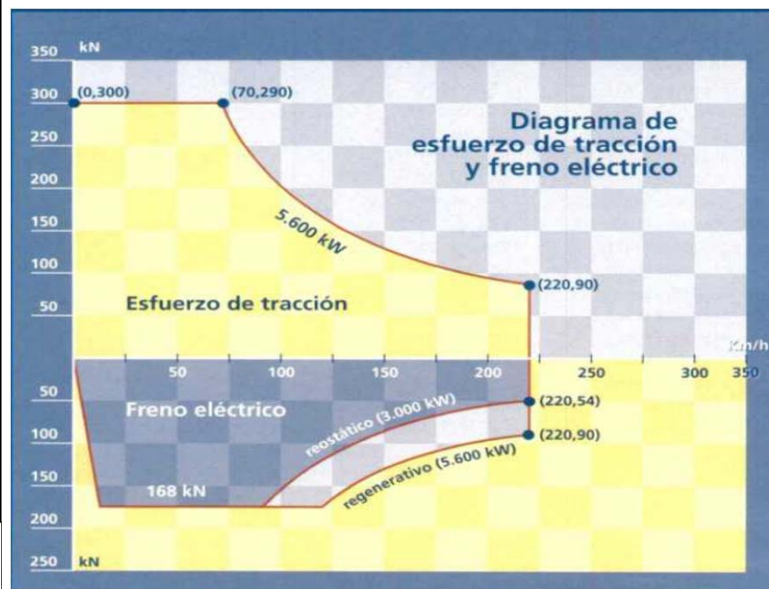


## ● Devolución de energía a las subestaciones

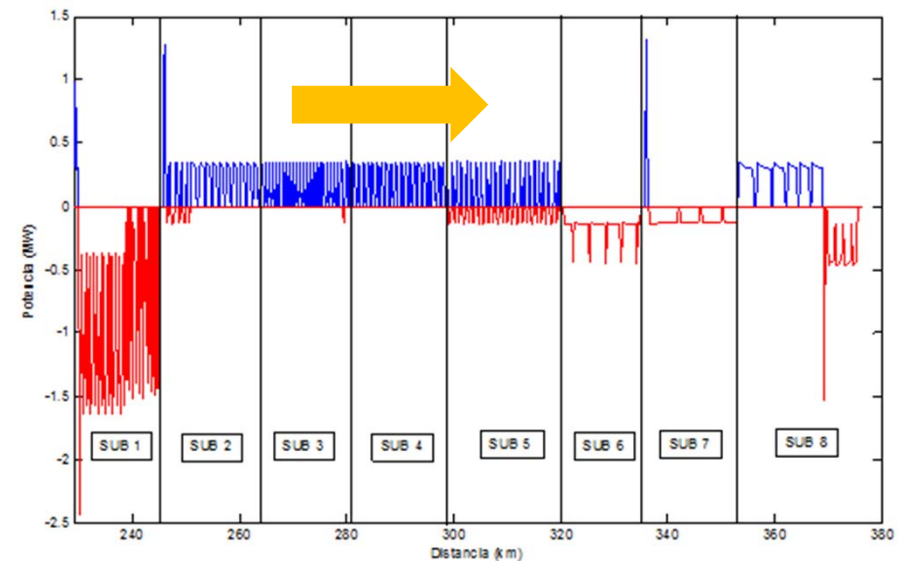
- Simulado con locomotoras S-252 (pasajeros), S-253 TRAXX (mercancías). Energía almacenable 95-200kWh



Curvas de tracción/frenado S-252



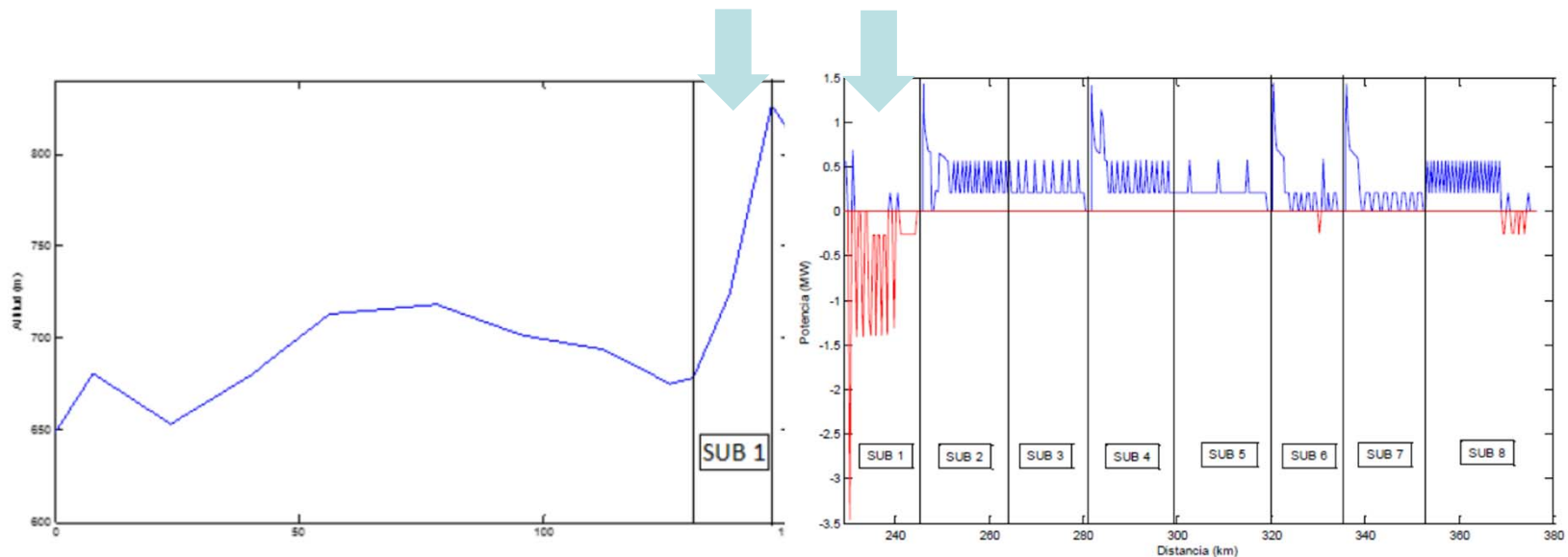
Potencia trayecto Chinchilla- Alcázar SJ



## ● Subestaciones en el trayecto considerado (3kV DC)

Nombre de la subestación	Codificación	Kilómetros hasta la siguiente subestación
Chinchilla	SUB 1	16
Albacete	SUB 2	18,5
La Gineta	SUB 3	17,3
La Roda de Albacete	SUB 4	16,8
Minaya	SUB 5	21,8
Villarrobledo	SUB 6	15,6
Socuéllamos	SUB 7	17,1
Río Záncara	SUB 8	23,5
Alcázar de San Juan	-	-

Tabla 9.8: Subestaciones eléctricas ferroviarias entre Alcázar de San Juan y Chinchilla



Perfil del trazado: Alcázar SJ-Chinchilla

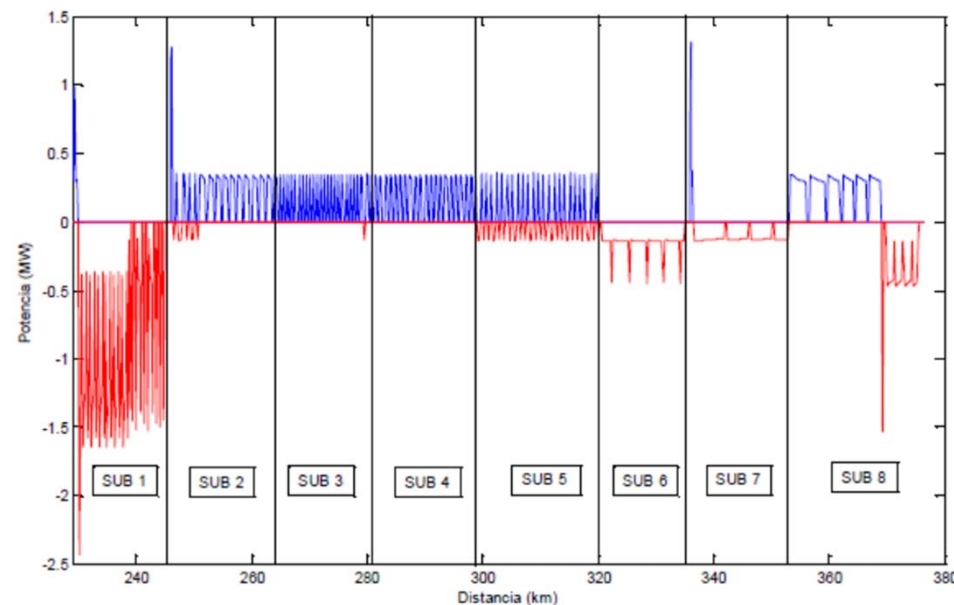
Potencias tren «subiendo» a Alcázar SJ





## ● Simulamos diferentes trenes:

- Pasajeros de 118t (Altaria con TalgoIV, 5 por sentido) y mercancías de 450t (3 en cada sentido)
- En mercancías el frenado es más destacado



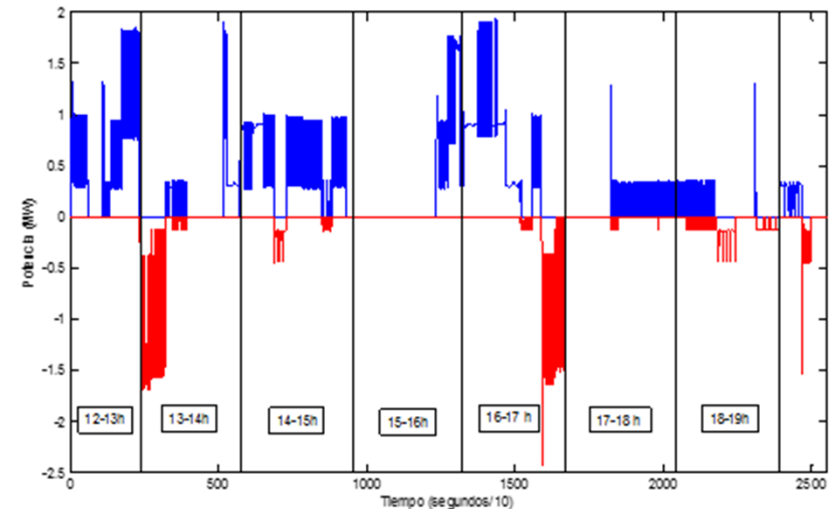
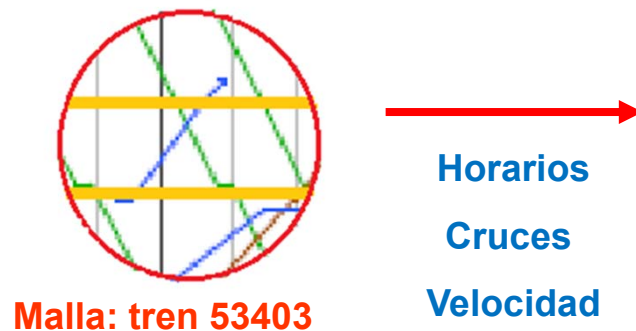
- Se obtienen las necesidades totales en cada subestación
  - Chinchilla (SUB 1) podría recuperar un 38% de su  $E^a$  necesaria

	SUB 1	SUB 2	SUB 3	SUB 4	SUB 5	SUB 6	SUB 7	SUB 8
Energía máxima (MJ)	1342,16	120,76	84,88	128,41	83,27	218,78	190,92	244,16
Energía máxima (kWh)	372,82	33,54	23,58	35,67	23,13	60,77	53,03	67,82



## ● Escenario 3: devolución a la red eléctrica

- Combinamos escenarios 1 y 2, calculando demanda y generación horaria ► curva de carga diaria del tram (operador o ADIF)
- Consumidor: tren de mercancías 53403 (Cartagena-Alcázar SJ)
  - Compra E<sup>a</sup> mercado diario
  - Y negocia E<sup>a</sup> secundaria



**Resultados:**  
**Ahorro ≈ 25%**

	Energía demandada (kWh)	Precio energía diario (€/MWh)	Coste energía diaria (€)	Energía recuperable (kWh)	Precio energía secundaria (€/MWh)	Beneficios energía secundaria (€)
15-16 h	389,11	67,60	26,30	249,10	72,00	17,94
16-17 h	106,64	69,10	7,37	6,33	72,47	0,46
17-18 h	370,19	69,27	25,64	20,09	69,00	1,39
18-19 h	668,89	68,10	45,55	6,74	68,00	0,46
19-20 h	313,69	65,42	20,52	196,35	65,50	12,86
20-21 h	98,03	63,80	6,25	42,32	66,98	2,83
21-22 h	73,24	65,42	4,79	59,24	67,98	4,03
Total	2019,79	-	136,43	580,17	-	39,96



## ● Análisis de pre-viabilidad: electrificación y ESS en líneas de bajo tráfico



TFG: Simulación del comportamiento energético de un convoy ferroviario

### ANÁLISIS COSTE - BENEFICIO

Costes unitarios	Eléctrica	Diésel
Electrificación	0,32 M€/km	-
Coste energía	59,22€/MWh	1,2€ litro comb(130€/MWh)
Coste de mant. locomotoras	1,2€/km	2,1 €/km
Costes de mant. electrificación	8000 €/km*año	-

COSTE ELECTRIFICACIÓN	96 M€
BENEFICIOS (consumo + mantenimiento)	10,2 M€/año
COSTE SISTEMA EMBARCADO	1,12 M€ (15 años)
COSTE SISTEMA FIJO	0,3 M€ (2-4 años)
BENEFICIOS ALMACENAMIENTO	187.350 €/año
BENEFICIOS VENTA DE ENERGÍA	200.458 €/año

### RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

**9 AÑOS Y 5 MESES (simple)**

Con almacenamiento o venta el tiempo se reduce entre 1 y 3 meses



## ● Escenario 4: ¿futuro?

- «Nuevas» tecnologías de ESS: Li-ion (vehículos), Na2S (almacenamiento), reducciones de costes, S-Condensadores
- Integración de renovables (RES) 2050, necesita:
  - Flexibilidad en el consumo (balance con la volatilidad RES)
  - Sistemas de almacenamiento (aprovechamiento RES)
- Nuevo mercado único de la electricidad
  - Necesidad de consumidores flexibles (oportunidad!)
  - Mercados abiertos a la negociación de energía y balances
- Consumo en transporte:
  - Combustibles fósiles, no es sostenible en EU ► potenciar FFCC!
- Proporcionar energía o gestionar el otro 30% de consumo de FFCC que no es tracción
- Escenario 3: OESS y SESS pueden proporcionar estabilidad al sistema eléctrico, y permitir una mejor gestión de la E<sup>a</sup> (€!)
- Escenario 1: reducción de pesos de los grupos diésel-eléctricos o mayor capacidad de aceleración.





## ● Posibles programas: Plan Nacional 2017-2020

- Proyectos «**Prueba de concepto**» (2 años): dirigidas a demostrar la viabilidad e interés potencial para las empresas de resultados previamente obtenidos en proyectos de I+D+i financiados a través de convocatorias de ayudas públicas de I+D+i.
- Proyectos «**Retos colaboración**» (3/4 años): avanzar en la incorporación de conocimientos y resultados científico-técnicos que permitan la validación y el desarrollo precompetitivo de nuevas tecnologías, productos y servicios.
- RETO 3: Energía Segura, Eficiente y Limpia
  - TECNOLOGÍAS DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EL DISEÑO DE REDES Y SISTEMAS DE GESTIÓN FLEXIBLES Y DISTRIBUIDOS
  - SISTEMAS ENERGÉTICOS EFICIENTES
- RETO 4: Transporte Sostenible, Inteligente, Conectado e Integrado
  - DISEÑO Y FABRICACIÓN DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE
- Publicación: ¿septiembre-noviembre 2018?



● ¡Gracias! ¿Preguntas?

● [www.demandresponse.eu](http://www.demandresponse.eu) (ENE2016-78509-C3-1&2-P)



● Agradecimientos



**Unión Europea**

Fondo Europeo  
de Desarrollo Regional  
"Una manera de hacer Europa"