

Optimización de la gestión energética

*Aurelio Rojo
Secretario General de ALAMYS
Director de Operación de Metro de Madrid*



Metro de Madrid, S.A.



Optimización de la gestión energética

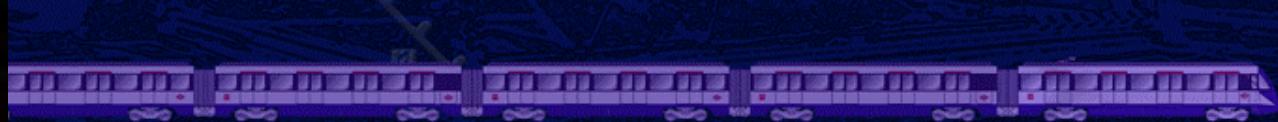
Gestión eficaz y económica del consumo energético

Motivos fundamentales

- Reducción del consumo energético global
- Reducción de los costes operacionales

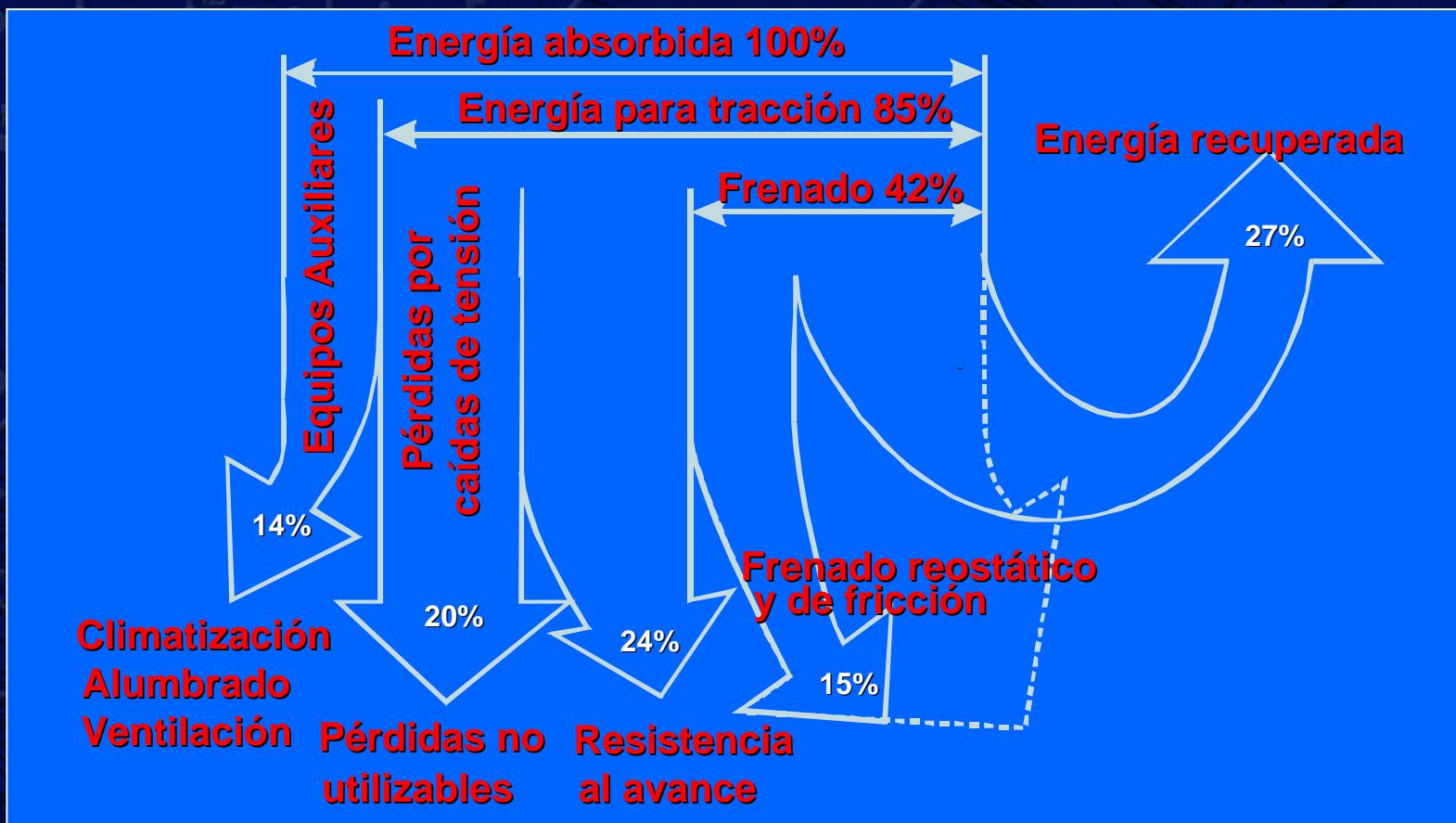
Criterios de gestión

- Constructivos y de diseño
 - Material móvil
 - Estaciones, infraestructuras, depósitos
- Operacionales
 - Conducción automática
 - Regulación integral de tráfico



Criterios de diseño de material móvil (I)

Actuación sobre los diferentes puntos del flujo energético



Criterios de diseño de material móvil (II)

- Disminución peso estructura de coches (materiales ligeros y resistentes)
- Incremento potencia específica (kw/kg)
 - Tracción trifásica
- Desarrollo electrónica de potencia (IGBT)
 - Mejora rendimientos
 - Disminución de peso
 - Recuperación de energía (27%)
- Desarrollo de equipos control, mando y comunicación
 - Bus datos
 - Control mediante microprocesadores
 - Sistema de informática de ayuda a la conducción y al mantenimiento



Criterios constructivos y de equipamiento

- Estaciones
- Iluminación -
(10% consumo)
 - Luminarias bajo consumo
 - Balasto electrónico
 - Programadores horarios
- Fuerza -
(20% consumo)
 - Escaleras mecánicas -
 - Arranque automático
 - Bajo consumo
 - Ventilación - Disminución perdidas aerodinámicas
 - Señalización ferroviaria
- Infraestructura
 - Perfil y traza óptimos
- Circuito alimentación
 - Incremento tensión alimentación 15 Kv. --> 45 Kv.
 - Incremento tensión circuito tracción 600v --> 1500/3000v



Criterios operacionales

- Primera etapa (NIVEL DE LÍNEA):
 - CONDUCCIÓN AUTOMÁTICA (ATO)
 - MARCHAS ECONÓMICAS
- Segunda etapa (CTC):
 - PROGRAMAS INFORMÁTICOS DE GESTIÓN DE TRÁFICO (SIRAT)

AHORRO ENERGÉTICO 15%

MEJORA DE LA REGULARIDAD 40%



N_Nocturno_21:00/01:

LINEA - 3

MARCHA NOMINAL

0

1

2

3

Instituto de Investigacion Tecnologica
SIRAT 3.2 DIMETRONIC S.A.

TIPO DE REGULACION

DESCONECTADA

INTERVALO

EN EXTREMOS

GLOBAL

TIPO DE SUPERVISION

DESCONECTADA

EN EXTREMOS

GLOBAL

LIMITES RETENCION

40 s NORMAL

60 s EXTREMOS

10 s ESPECIAL

FALTAN TRENES

EST.	TREN	INTERVALOS	TREN	INTJ.	ERR.H.	SIGU. I.D.	PROX. DET.	ERR. CAB.	T. VUE.	CORR. PLAN	M	ATRI
C2	1001		1001	01:58					38:48	00:17	2	
PF2	1002		1002	02:15					38:58	-00:08	1	
VB2	1003		1003	02:02					38:51	00:42	2	
M	1004		1004	02:28					38:40	00:00	0	
M	1005		1005	02:33					38:40	-00:04	0	
VR1	1006		1006	01:41					37:37	00:19	2	
PF1	1007		1007	01:52					37:47	00:27	2	
S1	1008		1008	02:52					38:25	-00:07	1	
S1	1009		1009	02:04					37:48	00:10		
F1	1010		1010	02:31					38:49	-00:30	0	
PF1	1011		1011	02:00					38:02	00:30	0	
D1	1012		1012	02:23					00:31	0		
I	1013		1013	02:59					38:36	-00:14	0	
I	1014		1014	01:36					38:21	00:29		
PF2	1015		1015	02:52					38:29	00:00	2	
E2	1016		1016	02:00					38:21	00:03	2	
LV2	1017		1017	02:28					38:40	00:00	0	

S.I.R.A.T.

Nº. TRENES

17

INT. MED.

02:14

INT. OBJ.

02:00

DES. STD.

24.74

DES. REG.

24.74

VU. CAB1

VAL1

VU. CAB2

VAM6

T.VUELTA

38:24

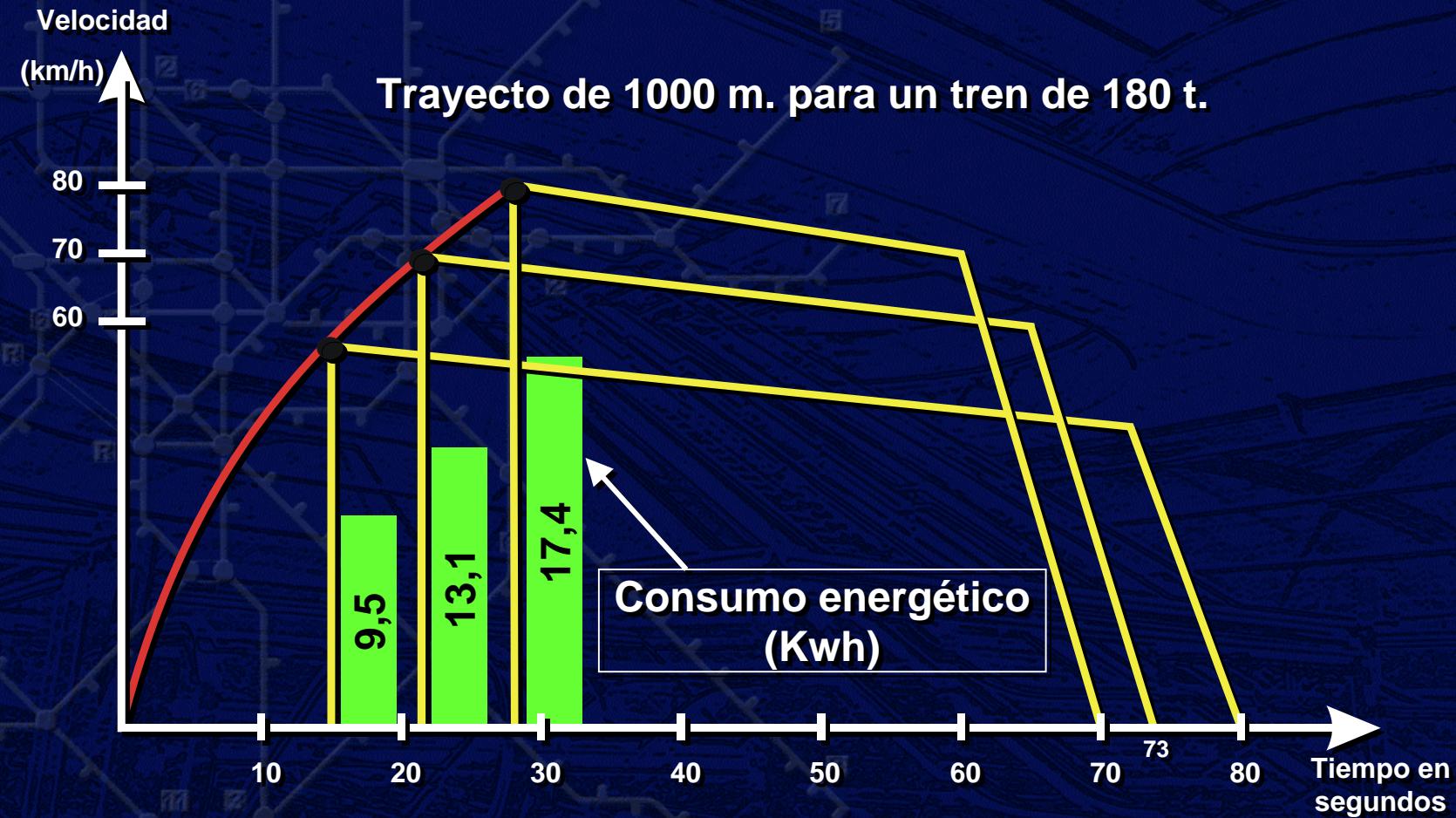
Sistema Integrado de Regulación Automática de Trenes



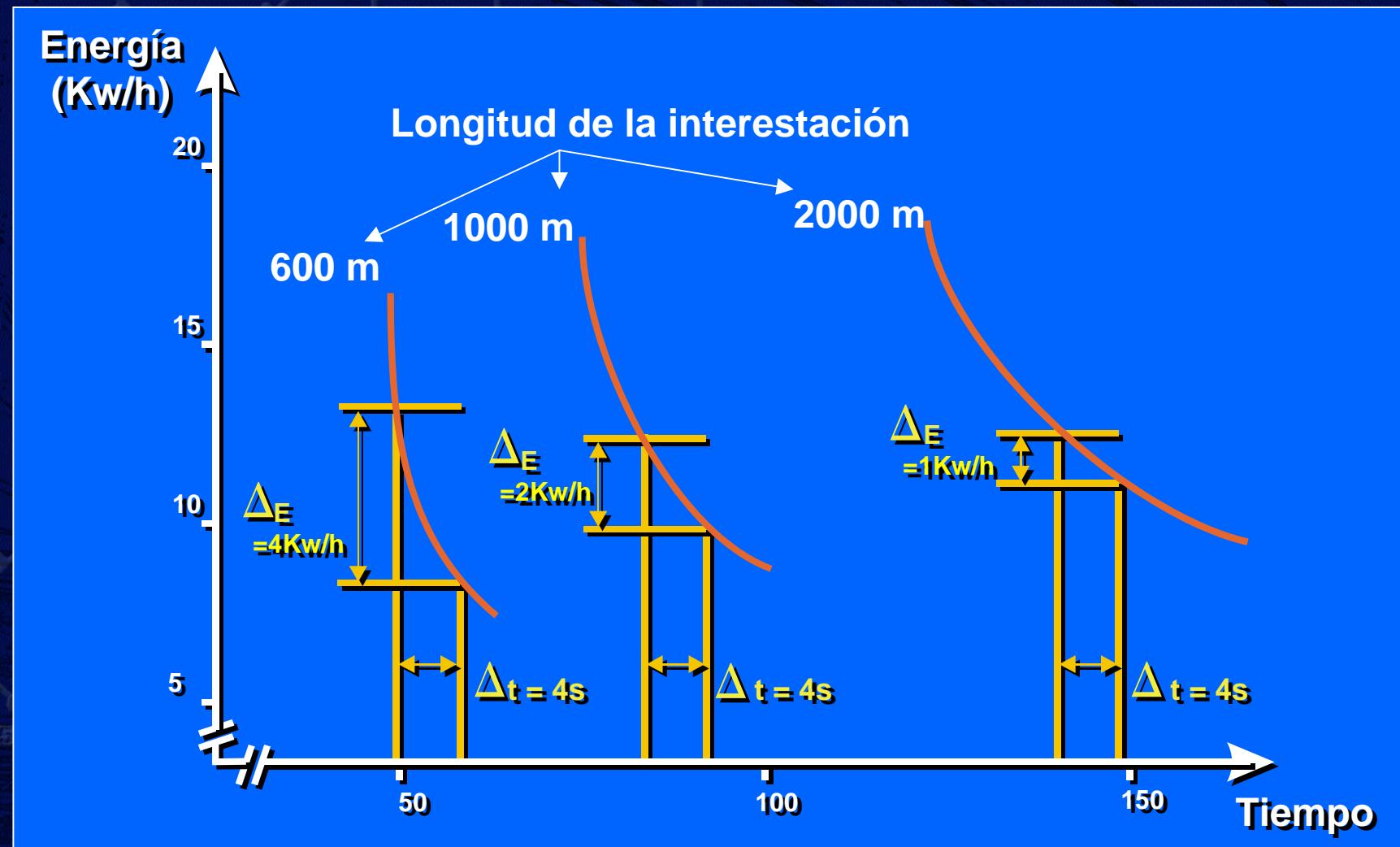
Metro de Madrid, S.A.



Gráfica de consumos - Tiempo recorrido (1)

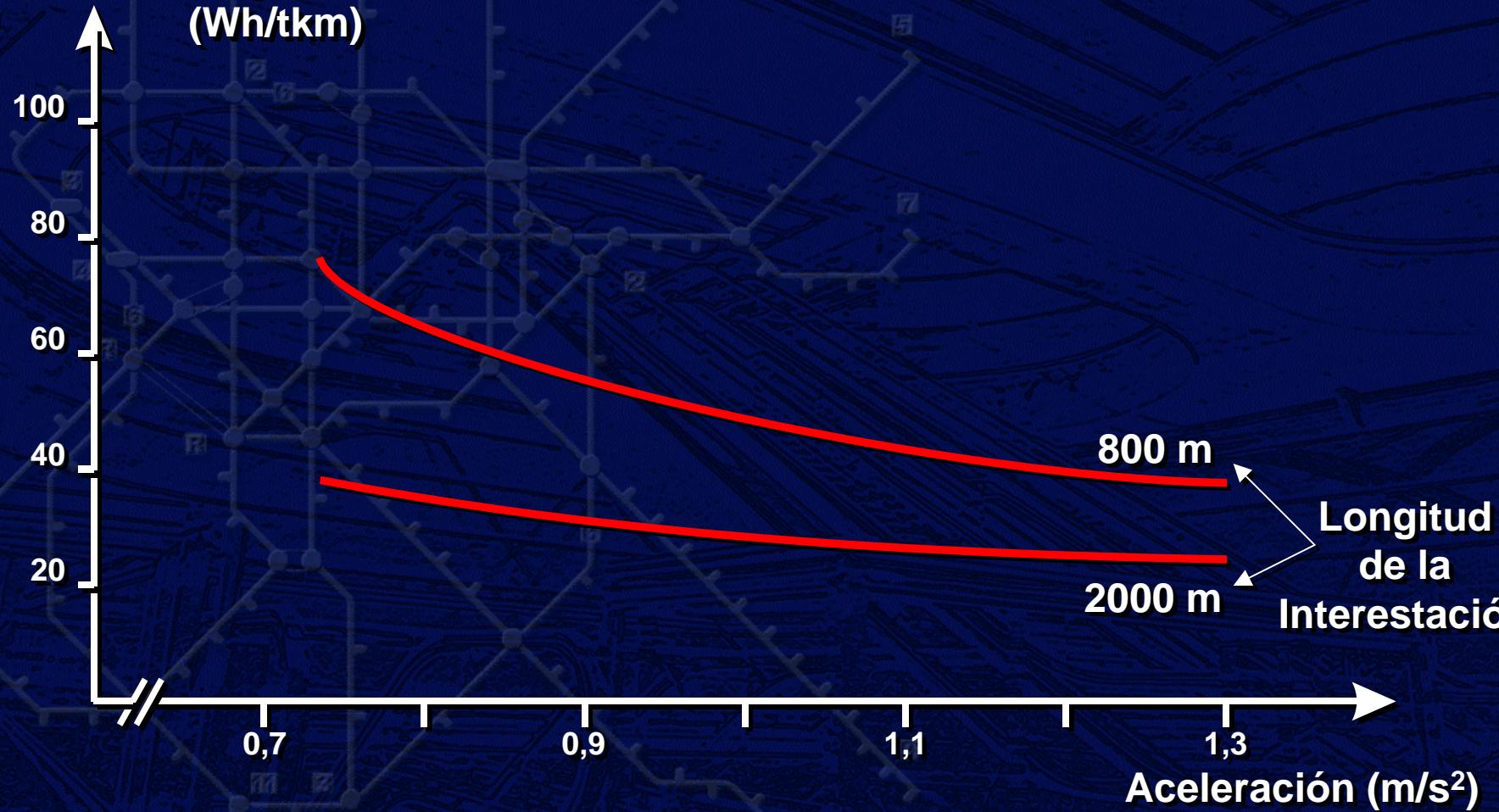


Gráfica de consumos - Tiempo recorrido (2)



Gráfica de consumos - Aceleración

Consumo energético
(Wh/tkm)



Longitud
de la
Interestación

2000 m

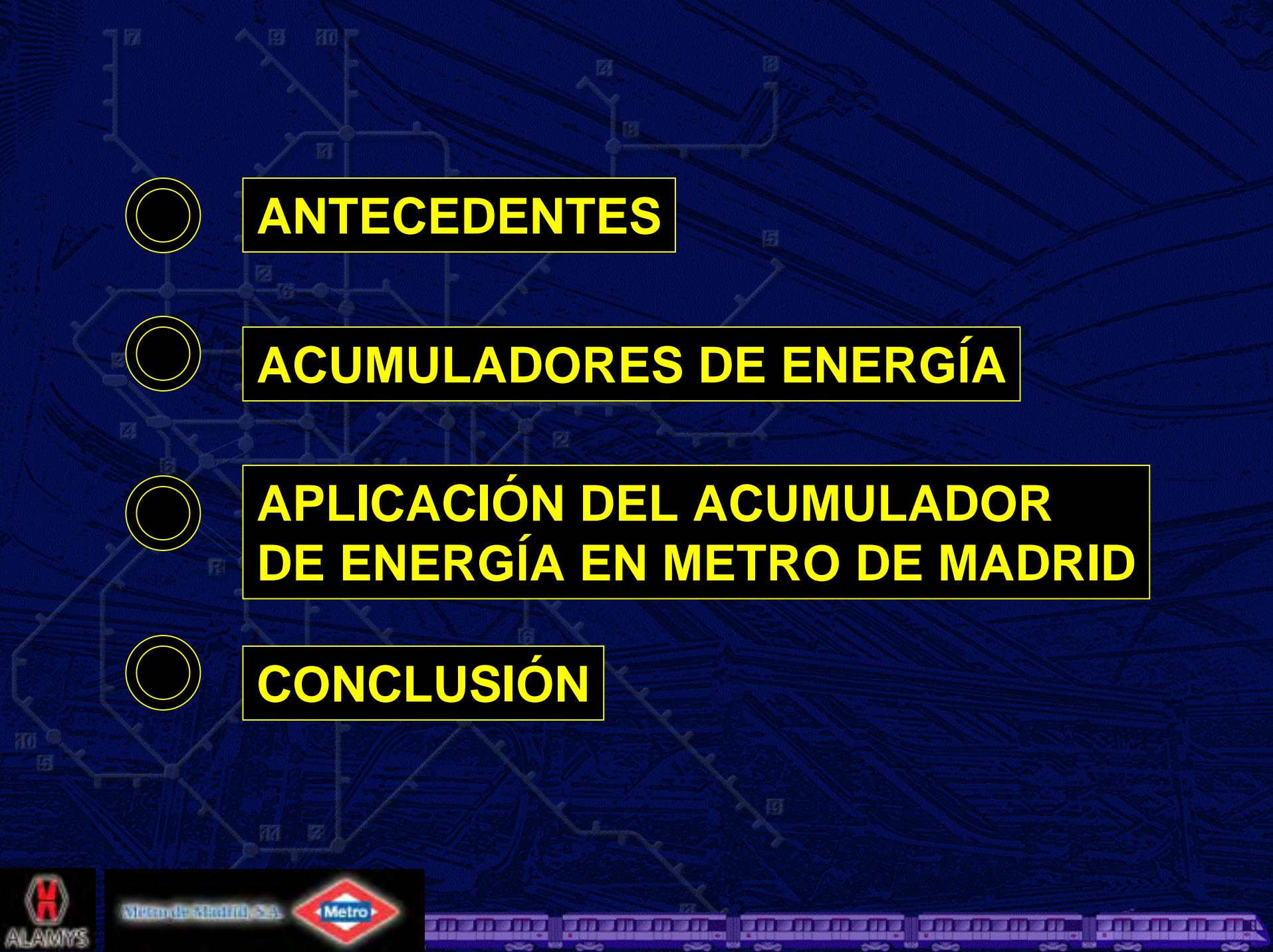
800 m

Aceleración (m/s²)



ACUMULADORES DE ENERGÍA





ANTECEDENTES

ACUMULADORES DE ENERGÍA

**APLICACIÓN DEL ACUMULADOR
DE ENERGÍA EN METRO DE MADRID**

CONCLUSIÓN



ANTECEDENTES

El consumo de energía eléctrica supone una parte importante del presupuesto de Explotación.

CONSUMO TOTAL AÑO 2.000: 480.000.000 Kwh

**Consumo de tracción
340.000.000 Kwh**

**Consumo de SS/AA
140.000.000 Kwh**

El propósito de METRO DE MADRID es:

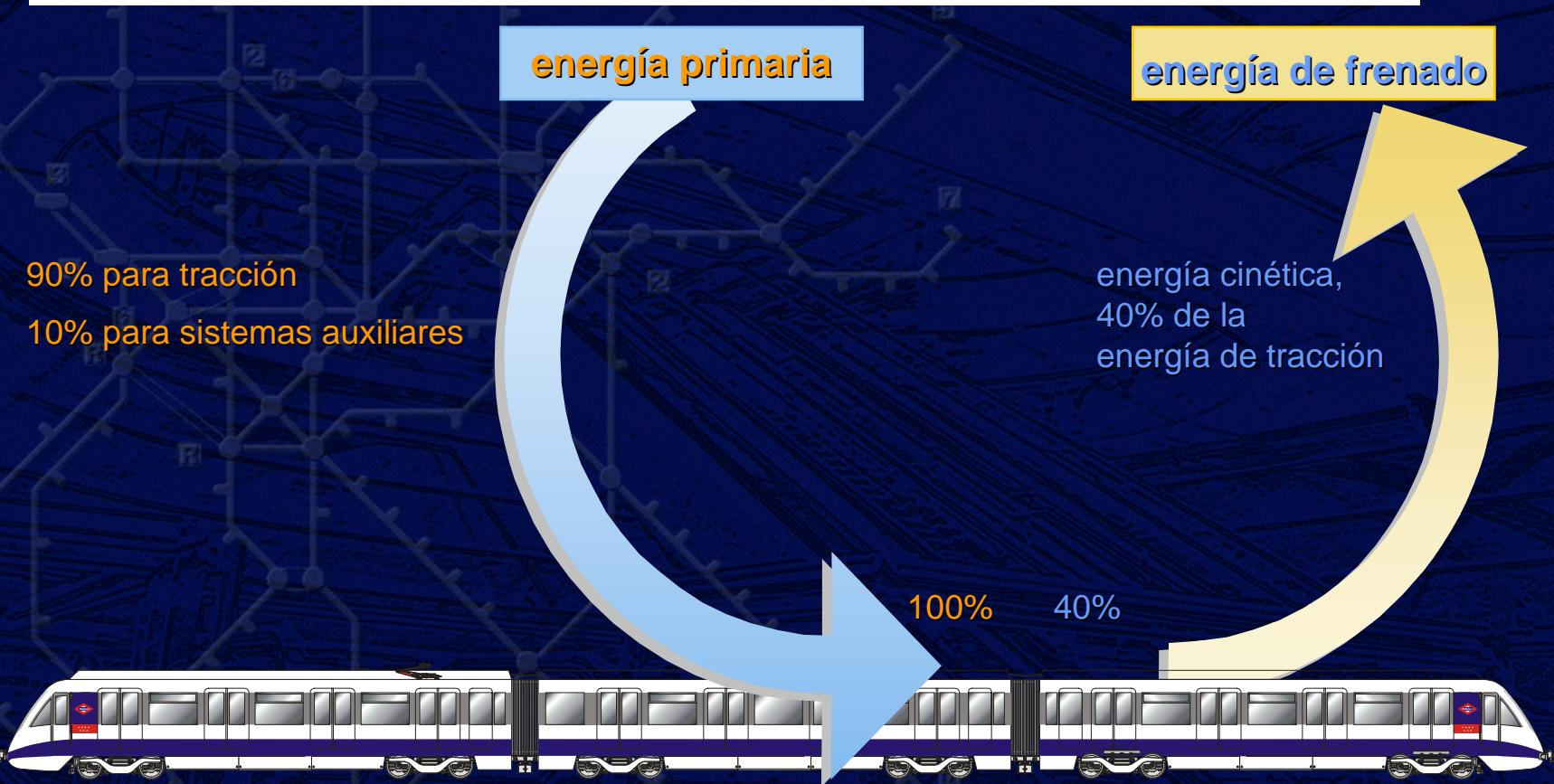
Optimizar los costes de operación, minimizando el coste de energía mediante soluciones y sistemas innovadores.

Contribuir a la protección del medio ambiente reduciendo las emisiones de CO₂ en origen.



ANTECEDENTES

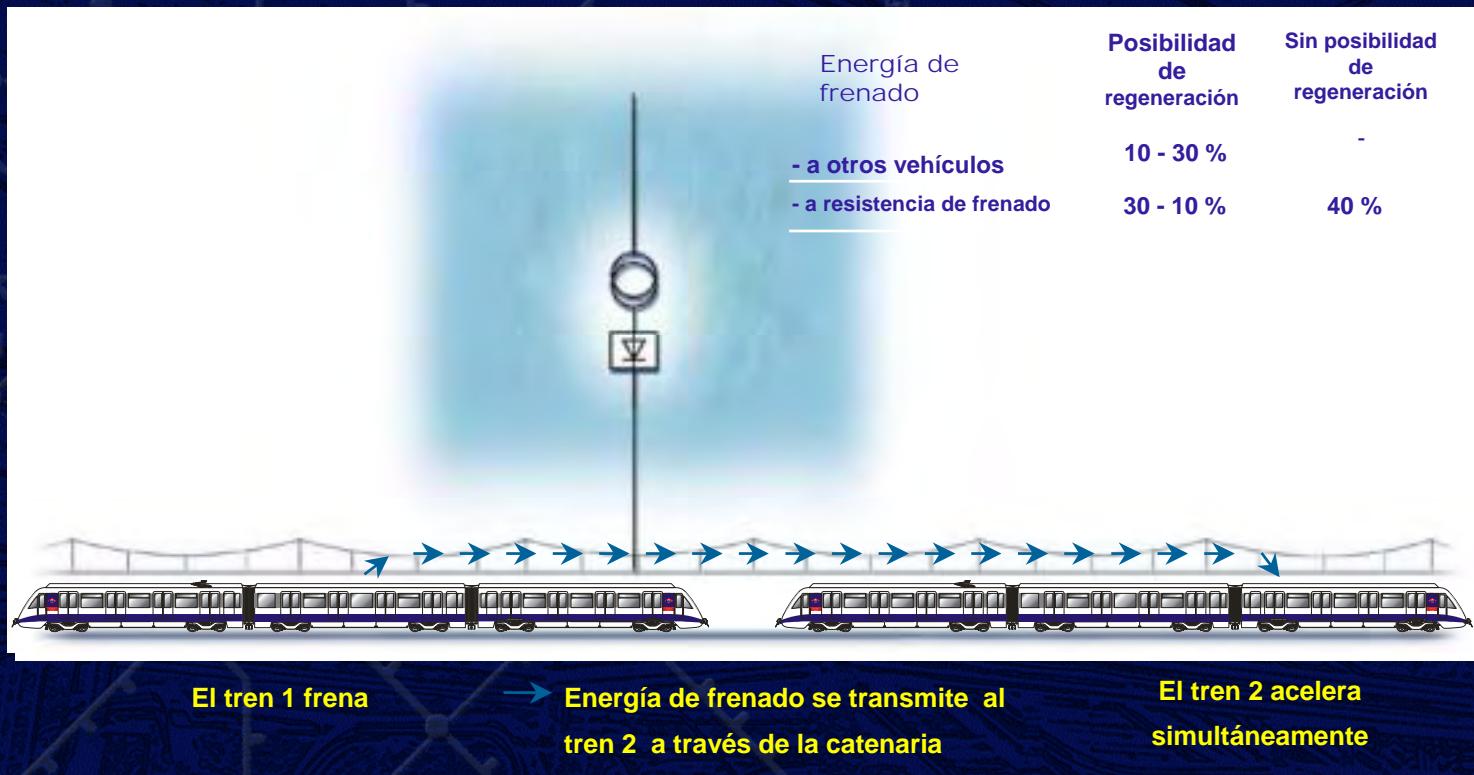
Las unidades modernas pueden devolver durante el frenado hasta un 40% de la energía tomada durante los procesos de arranque.



Intercambio de energía entre vehículos

ANTECEDENTES

Sólo en caso de simultaneidad de los procesos de frenado y aceleración de dos trenes, la energía del tren que frena puede ser utilizada para acelerar otros trenes.

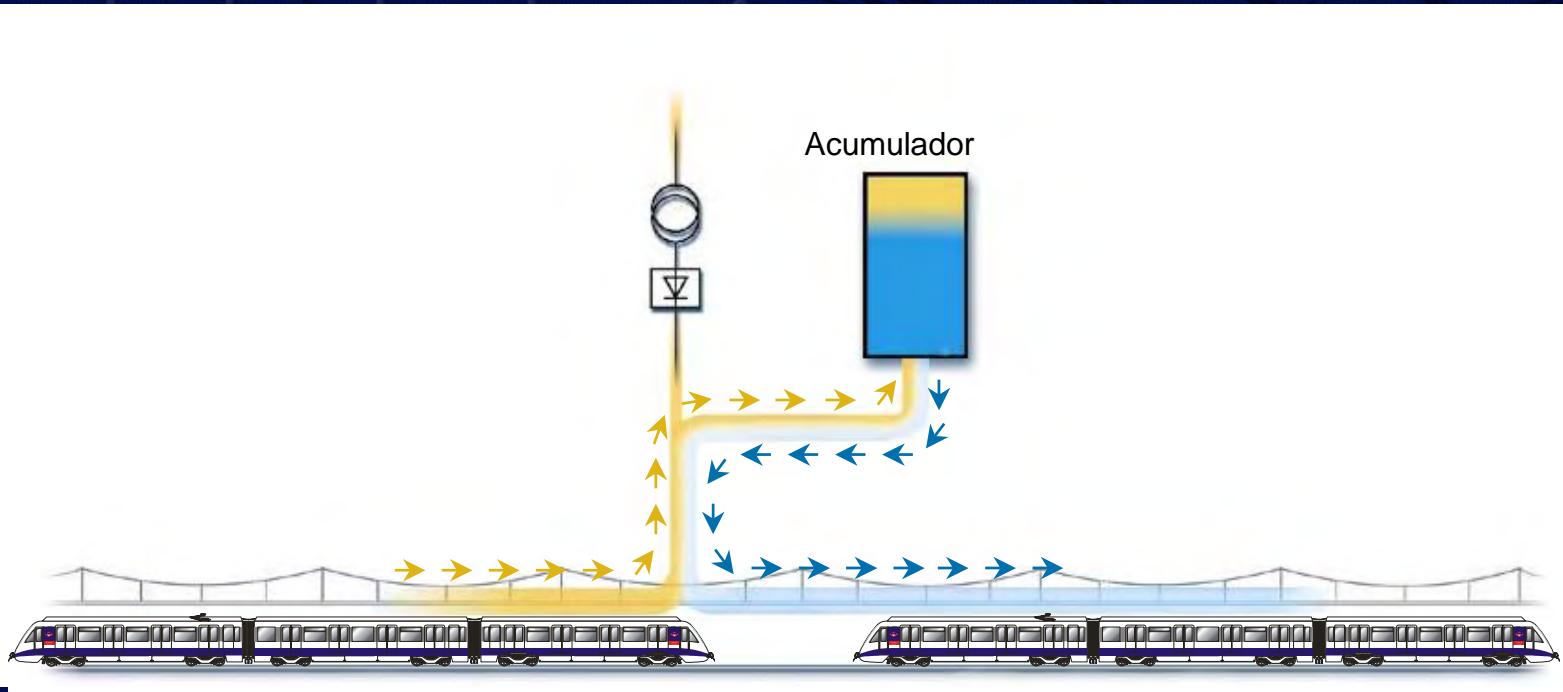


Aún en situaciones óptimas sólo se puede aprovechar el 70% de la energía de frenado.

ANTECEDENTES

Solución

Disponer de sistemas acumuladores de energía que puedan absorber la energía generada y devolverla a la catenaria cuando haga falta.



Instante t_1
El tren 1 frena
→ el acumulador absorbe energía

Instante t_2
El tren 2 acelera
→ el acumulador entrega energía

El acumulador permite espaciar en el tiempo los procesos de frenado y aceleración e incluso aprovechar la energía de frenado de un tren en una estación para su arranque posterior.

Introducción

ACUMULADORES DE ENERGÍA

Pueden integrarse en la S/E o en cualquier punto de la Red de tracción.

Propiedades

REDUCCIÓN DE LA INVERSIÓN POR:

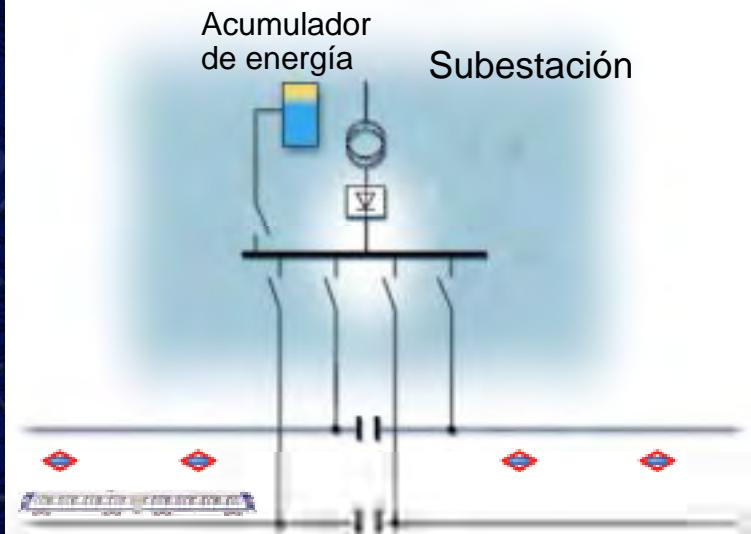
Menor número de subestaciones

Reducción de las pérdidas

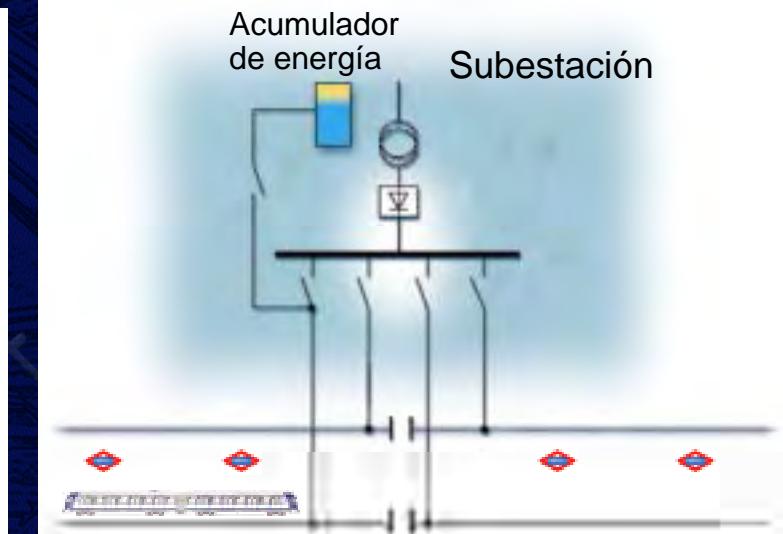
Optimización del uso de energía de frenado

Reducción de picos de potencia

MAYOR ESTABILIDAD DE LA TENSIÓN DE CATENARIA



Variante 1:
Conexión a las barras de alimentación



Variante 2:
Conexión al feeder de línea

ACUMULADORES DE ENERGÍA

Ventajas de su utilización

- Aprovechamiento de la energía de frenado y reducción de los costes de explotación
- Reducción de picos de potencia
- Reducción de la emisión de CO₂ (por reducción del consumo energético)
- Estabilización de la tensión de tracción
- Reducción de la tensión de contacto
- Reducción de la potencia nominal de subestaciones
- Recuperación de trenes durante fallos de suministro
- Mayor distancia entre subestaciones
- Reducción del coste total del sistema como primera implantación

ACUMULADORES DE ENERGÍA

Inconvenientes

-  Incorporación de modernas tecnologías con los costes de adaptación y formación asociados
-  Tecnologías aún poco experimentadas
-  Pocas Empresas oferentes y, por tanto, sector relativamente cautivo



ACUMULADORES DE ENERGÍA

Tecnologías disponibles

► Baterías

► Bobinas superconductoras (SMES)

► Sistemas rotativos

► Condensadores de doble estrato



ACUMULADORES DE ENERGÍA

Baterías de plomo o níquel-cadmio

Solución muy simple

Tecnología abandonada por:

Permitir un reducido número de ciclos de trabajo → corta vida útil

Elevado coste

Nula protección del medio ambiente

No poder aportar potencias elevadas



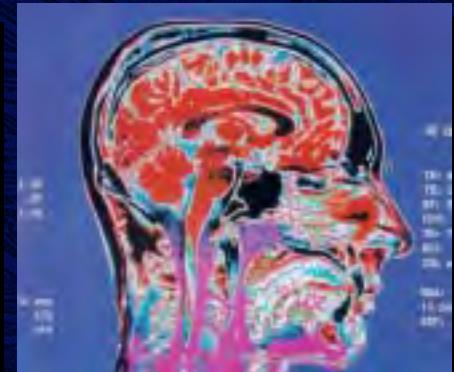
Bobinas superconductoras (SMES)

Sistema muy moderno:
Superconductive Magnetic Energy Storage (SMES)

Sólo disponible en aplicaciones de electromedicina
y SAI'S para ordenadores

Coste muy elevado

Para ferrocarriles, esta tecnología se encuentra en
un nivel puramente teórico



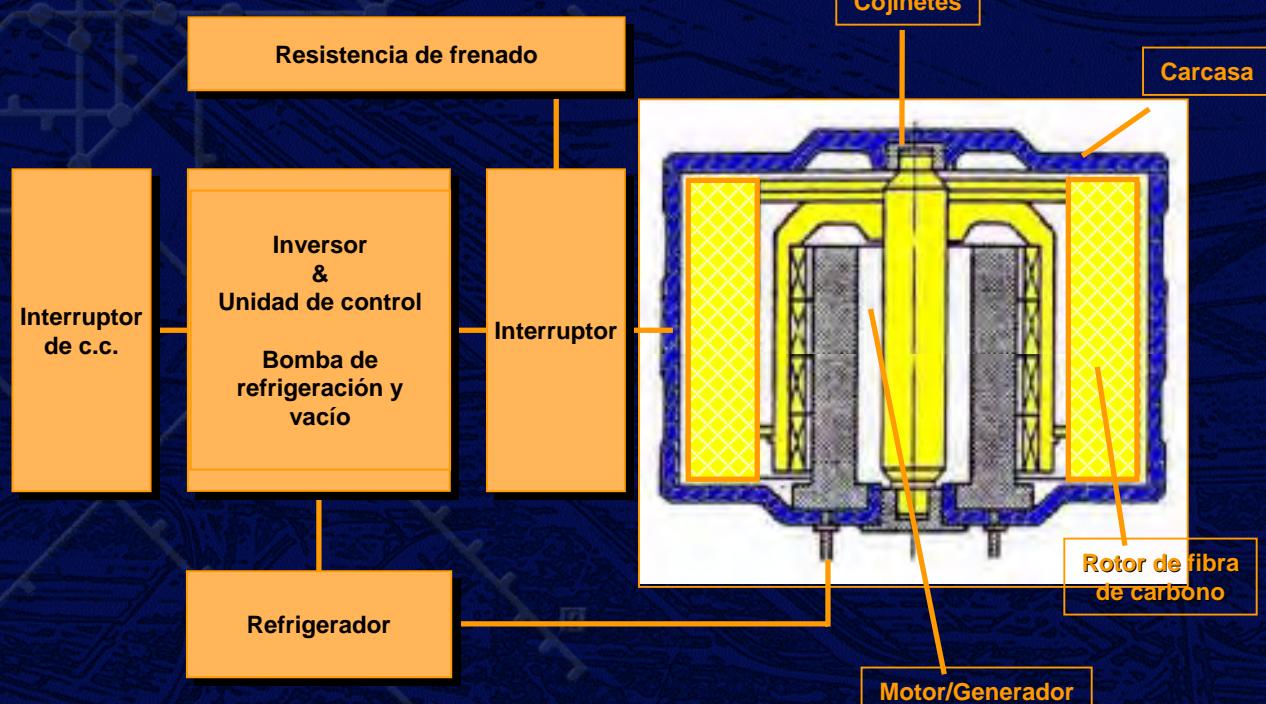
ACUMULADORES DE ENERGÍA

Sistemas rotativos

Máquinas eléctricas basadas en la energía cinética de rotación de un sólido rígido girando alrededor de un eje:

$$W = \frac{1}{2} I \cdot \overline{\omega}^2$$

Convierte la energía eléctrica regenerada en cinética de rotación y viceversa.



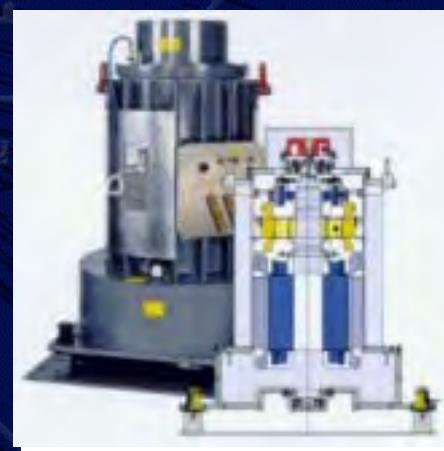
ACUMULADORES DE ENERGÍA

Sistemas rotativos Descripción del sistema

Existen varias soluciones tecnológicas basadas en este principio:

Tessag-Piller → Metro ligero de Hannover

Siemens (volante inercial) → Metro de Colonia



Sin embargo, su mantenimiento es muy complejo:

- Elevadas velocidades de rotación
- Construcción en vacío
- Cojinetes magnéticos

ACUMULADORES DE ENERGÍA

Acumulador mediante condensadores

El estado del arte de los condensadores de doble estrato permite su empleo como medio de acumulación de energía

Particularidades de la tecnología de acumulación de condensadores de doble estrato:

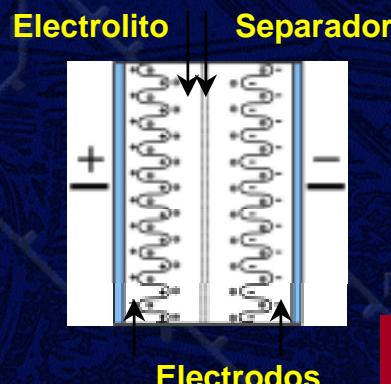
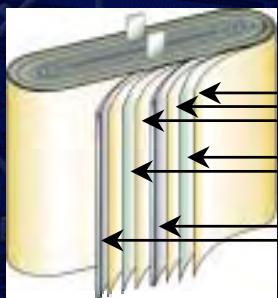
Rendimiento elevado

Capacidad de carga/descarga con alta dinámica

Elevada resistencia de ciclo

Sin mantenimiento en comparación al acumulador rotativo de energía

Contenido de energía escalable



Datos técnicos

Tensión: 2,5 V

Capacidad: 2400 F



Tecnología elegida por
Metro de Madrid
para su ensayo y estudio

ACUMULADORES DE ENERGÍA

Comparación de tecnologías

	Baterías	SMES	Volante Inercial	Condensadores de doble estrato
Potencia	+	+	+	+
Densidad de potencia	--	++	++	++
Densidad de energía	+	+	+	+
Energía necesaria	--	+	++	++
Experiencia	+	-	-	-
Vida útil	-	+	+	++
Complejidad	+	-	O	+
Riesgo ambiental	-	+	+	O
Coste	-	--	+	+

APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Situación y entorno

Metro de Madrid se encuentra en la actualidad enfrentado a un doble desafío:

- Aumento de los costes de operación y obligación de reducir la polución del medio ambiente.
- Demanda creciente de movilidad, en un entorno cada vez más competitivo

Situación en las líneas anteriores a las reconvertidas o a las construidas dentro del actual Plan de Ampliación 1.999-2.003:

Tensión de trabajo: 600 V c.c.

Aumento del número de vehículos en circulación

Aumento de los servicios auxiliares de los vehículos

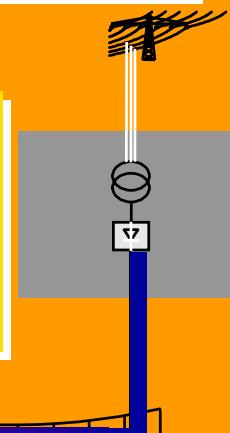
Aumento de la capacidad de tracción de los vehículos

Sectores de tracción alimentados en T

- Tensión baja
- Corrientes altas
- Grandes pérdidas de energía
- Corta distancia entre las subestaciones
- Subtensiones en los extremos de los sectores

Soluciones actuales

- Instalación de nuevas subestaciones intercaladas entre las existentes
- Cambio a una tensión más elevada: 1.500 V c.c.
 - + Alto coste de las instalaciones nuevas o de las transformaciones necesarias
 - + Necesidad de nuevo material móvil



APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Ventajas de su instalación

- ▶ Reducir los costes de inversión mediante la combinación de las subestaciones en menor número y los acumuladores de energía
- ▶ Reducir los costes de energía primaria por aprovechamiento de la energía de frenado
- ▶ Reducir los costes de mantenimiento de material móvil por reducción del desgaste de los frenos mecánicos
- ▶ Estabilizar la tensión de tracción montando los acumuladores de energía en puntos alejados de las subestaciones eléctricas
- ▶ Contribuir a la protección del medio ambiente mediante la reducción de las emisiones de CO₂



APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Elección del acumulador

Requerimientos a considerar:

Elevada resistencia frente a los ciclos de trabajo

- 200 procesos de carga y descarga por día

- 10^7 ciclos de acumulación sin pérdida de capacidad

Alto rendimiento

Alta energía y potencia específica

Alta seguridad eléctrica y mecánica

Buenas posibilidades de regulación

Bajos costes de mantenimiento y de inversión

La tecnología de más futuro, a juicio de Metro, es la basada en condensadores de doble estrato.

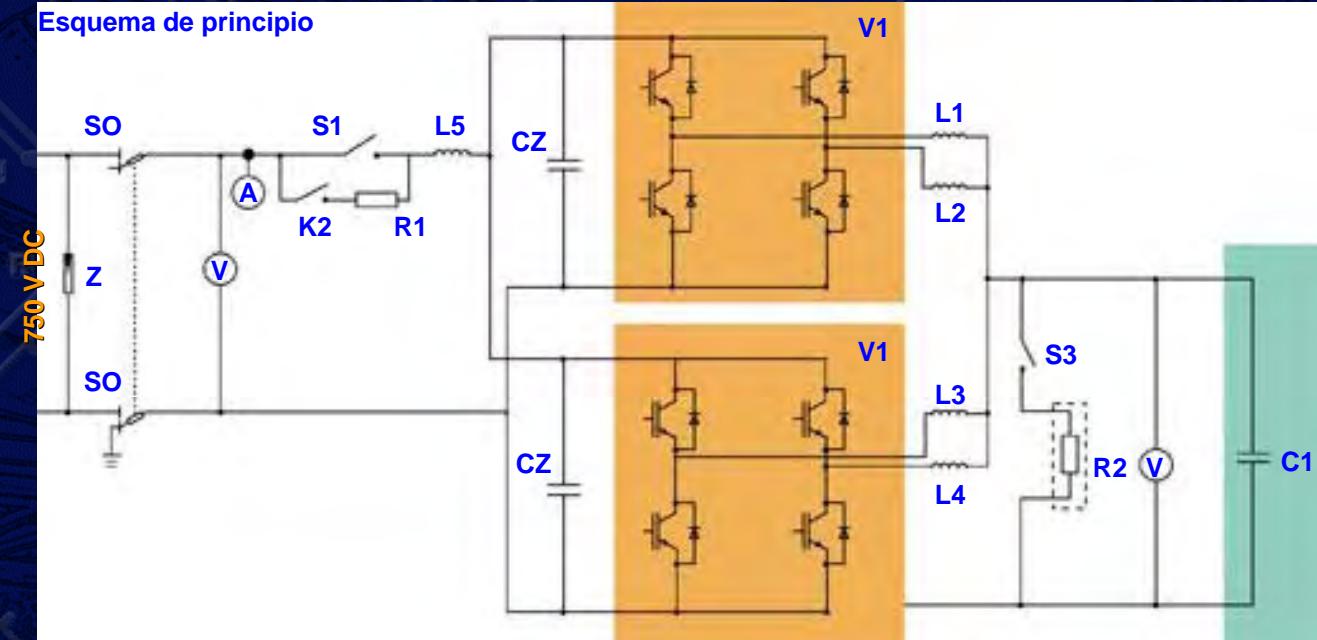
APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Acumulador estático por condensadores

Estructura del sistema

Este sistema consta de una unidad acumuladora de condensadores conectada a la Red de tracción a través de un convertidor con unidad de conexión.

Esquema de principio



Z Autoválvula

SO Seccionador de seguridad

S1 Relé de red

K2 Relé de pre-carga

R1 Resistencia para la pre-carga

L5 Inductancia para el filtro de red

CZ Condensador circuito intermedio

V1 Chopper

L1-4 Inductancia del chopper

S3 Interruptor resistencia de descarga

R2 Resistencia de descarga

C1 Unidad acumulador condensadores

APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Acumulador estático por condensadores Característica técnicas

Condensadores de doble estrato (Double-Layer Capacitors: DLC) con elevada capacidad de ciclo

Transistores IGBT de última generación

Autovigilancia permanente de todo el equipo mediante procesadores de última generación

Protección total, con sistema de desconexión en caso de fallo interno

Dos versiones de suministro:
Contenedor (listo para conexión)
Componentes estándar discretos

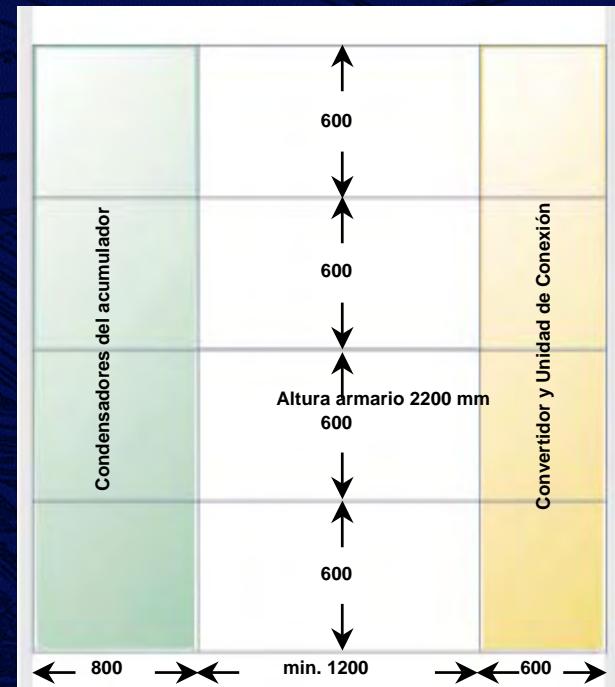


Unidad chopper

APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Acumulador estático por condensadores Datos técnicos

Tensión de entrada	600 V c.c.
Tensión de entrada(rango de tolerancia)	según EN 50163
Medio de acumulación	condensadores
Número total de condensadores	aprox. 1300
Capacidad total	64 F
Energía acumulable	1,6 kWh
Ahorro energético máximo posible a la hora	65 kWh/h
Potencia de pico	1 MW
Rendimiento batería de condensadores	0,95
Rango de temperatura	-20 a 40 °C
Altura max. de funcionamiento	1000 m
Alimentación de los serv. auxiliares	400 V c.a.
Dimensiones para el contenedor (L x An x Al) mm	2800 x 3000 x 2800
Peso del contenedor	aprox. 5,5 t



Vista en planta

APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Acumulador estático por condensadores Dinámica del sistema

El beneficio del almacenamiento de energía está influido por su interacción con todos los posibles estados de marcha

El acumulador debe responder rápidamente a los cambios en la línea.

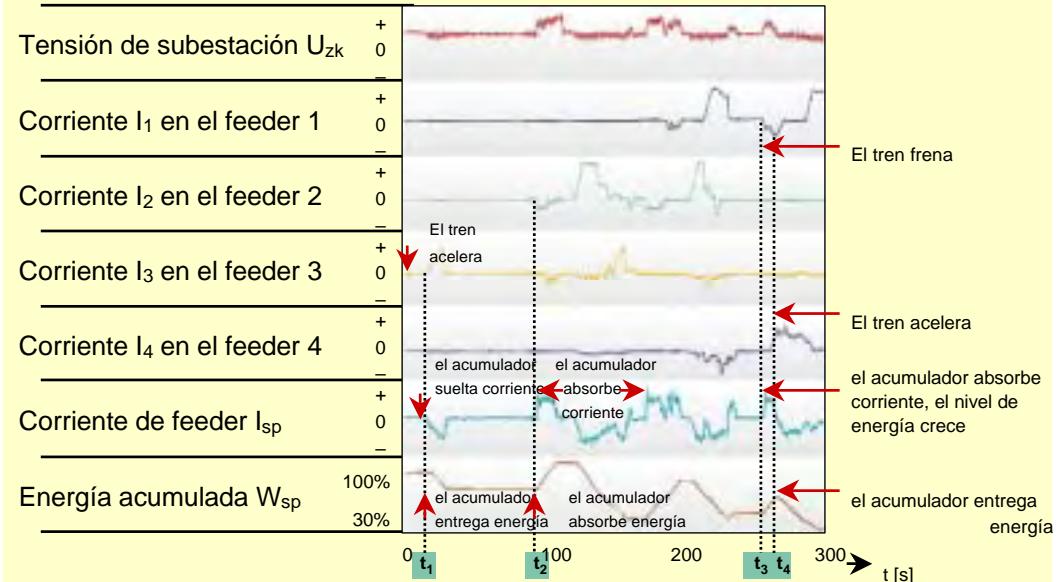
La respuesta dinámica del acumulador debe garantizar un intercambio óptimo de potencia con el sistema.

El recibir y entregar energía se regula en función de pequeñas variaciones de la tensión de tracción.

La estrategia de regulación debe adaptarse a la meta que se desea conseguir:

- Estabilización de la tensión de catenaria.
- Ahorro máximo de energía.
- Supresión de los picos de potencia en la Red.

Dinámica del regulador desarrollado especialmente para el acumulador



APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Localización de la ubicación

La ubicación del acumulador es decisiva para la eficiencia del sistema

Factores más influyentes para determinar la ubicación del acumulador:

Capacidad de regeneración en todos los trenes de la línea.

Problemas de subtensiones en las proximidades del acumulador.

Disponibilidad de espacio físico.

Número de trenes en circulación.

Peso y velocidad de los trenes.

Número de frenadas y aceleraciones en los alrededores del acumulador.

Topología de la línea

Metro de Madrid ha decidido instalar un acumulador estático para llevar a cabo una prueba piloto en el extremo del sector Goya-Ventas de Línea 2, alimentado por la subestación de Salamanca.

Principio de soporte de la tensión de catenaria

El propósito de la instalación del acumulador es:

- Analizar su comportamiento como soporte de la tensión de catenaria.
- Analizar su contribución al ahorro de energía.

Para asumir la función de contrarrestar la caída de tensión, el acumulador debe:

- Entregar energía durante todo el proceso de arranque de la unidad móvil.
- Suministrar una corriente acumulada de una magnitud determinada durante el lapso de descarga.

El objetivo es mantener, en la medida de lo posible, cargado el acumulador de forma completa.



APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Dimensionamiento del acumulador

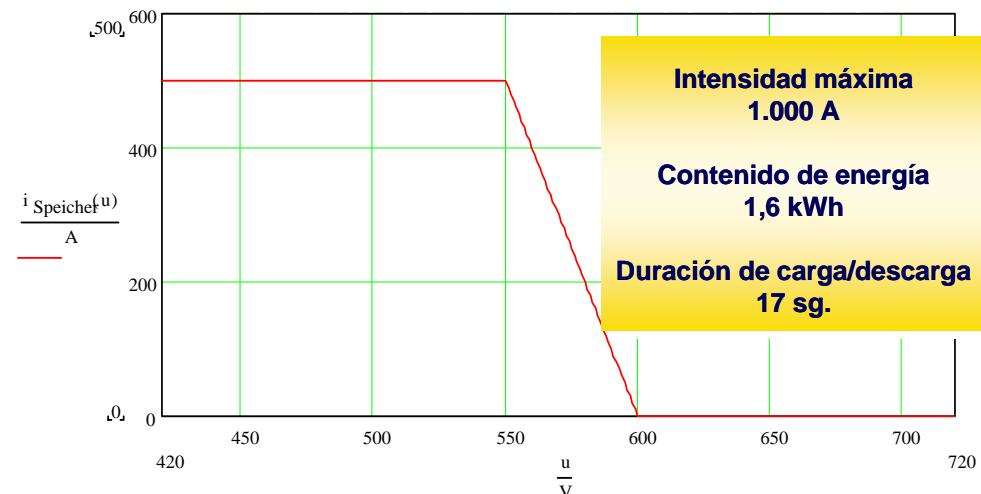
A la hora de dimensionar un acumulador, el contenido de energía y la corriente de descarga del acumulador deben combinarse de forma óptima

La corriente de descarga se determina por la tensión en bornas del propio acumulador.

El contenido de energía viene determinado por la energía cinética de los vehículos, es decir, la velocidad y el peso de los vehículos, de acuerdo con:

$$W = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Resulta un acumulador de las siguientes características.

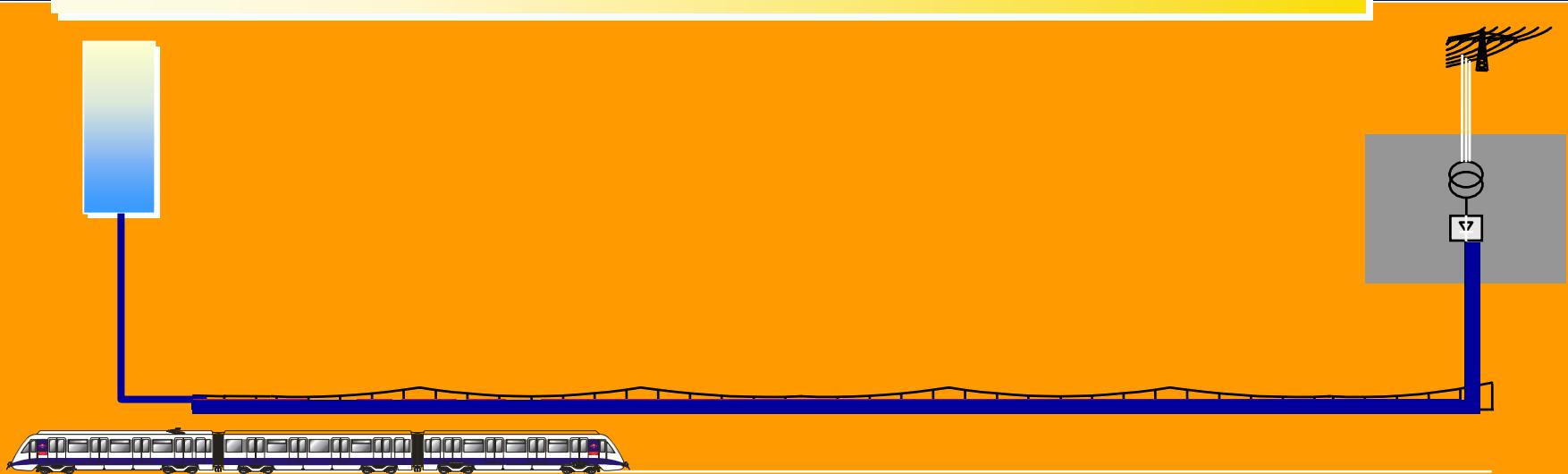


APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Soporte de tensión estimado

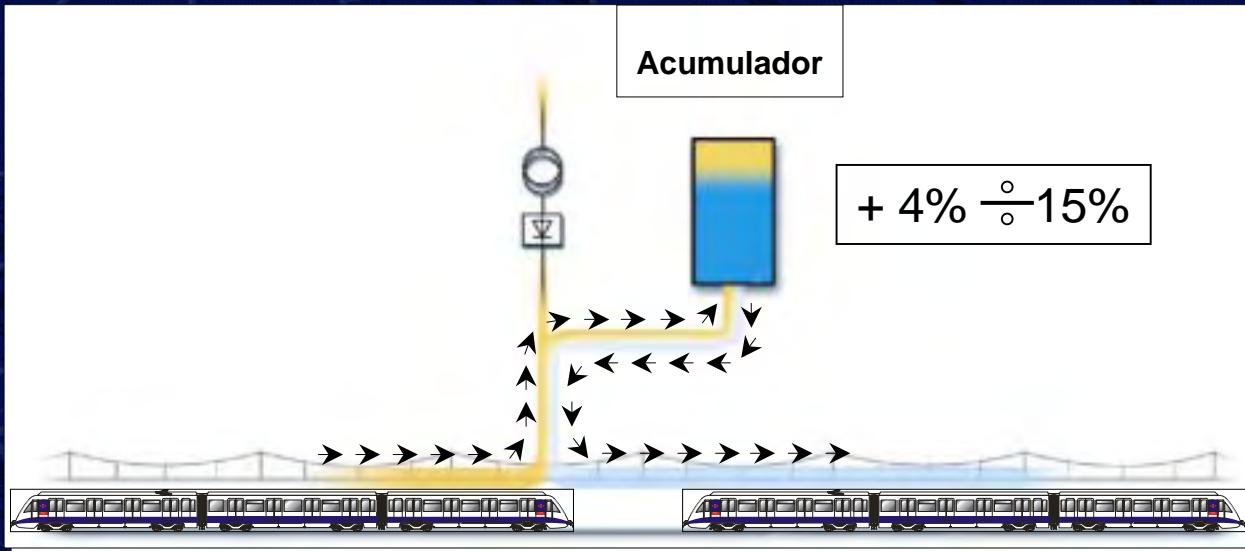
Se toman como base los datos del punto de instalación del acumulador en Línea 2.

Mediante simulación informática se obtiene que la instalación del acumulador podría elevar la tensión en ese punto en 25 V (aprox. 20% de reducción de la caída de tensión).



APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Contribución al ahorro de energía



Cálculos y mediciones realizados bajo diversos supuestos muestran que puede almacenarse y devolverse adicionalmente entre el 4% y el 15% de la energía absorbida.

La energía absorbida puede reducirse entre el 4% y el 15%.

APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

Ahorro potencial de energía en Línea 2

DATOS DE PARTIDA:

Reducción de la energía consumida: 4% 15%.

Energía consumida durante el año 2.000 en Línea 2: apróx. 11,5 Gwh/año.

Precio de la energía: 8,5 Ptas/Kwh.

Ahorro potencial de energía: 460 ... 1.725 Mwh/año

Ahorro potencial de costes: 3,91 14,7 Mlls. Ptas/año



CONCLUSIÓN

Resultados del estudio teórico:

La utilización de acumuladores estáticos de energía representa una alternativa ventajosa en redes de corriente continua cuando al aumentar el tráfico en la línea se necesita adoptar medidas para estabilizar la tensión de la catenaria y optimizar el número de subestaciones.

La utilización de acumuladores de energía puede contribuir de forma muy importante al ahorro de energía.

Mejora la ecología por el ahorro de energía que proporciona.

Ha llegado el momento de ensayar en la práctica estos acumuladores.

Inicio de los ensayos del acumulador en la Línea 2: Enero de 2002