

# 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

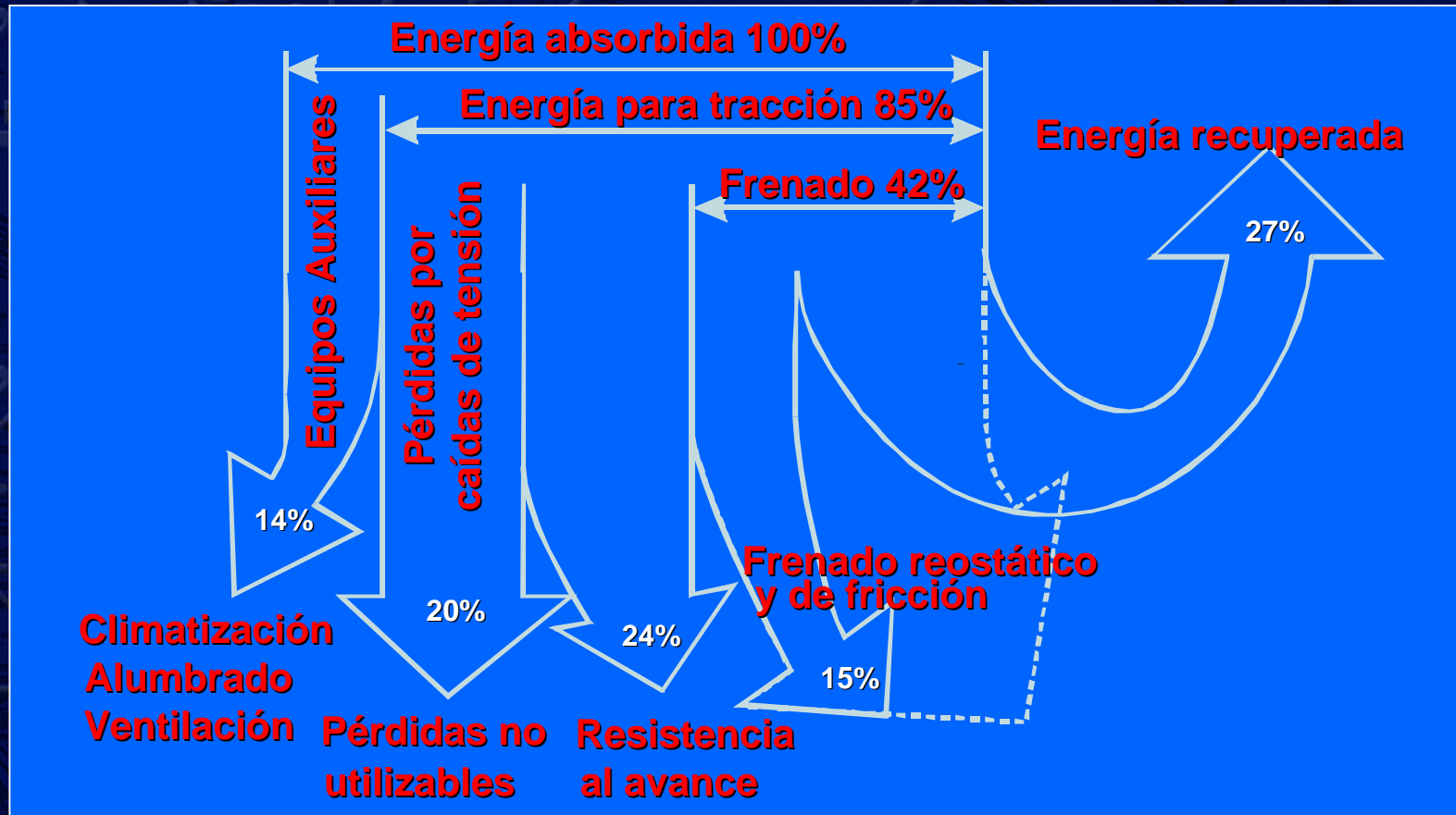
## Criterios de gestión

- 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 pérdidas 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

EST.	TREN	INTERVALOS	TREN	INTJ ERR.H.	VEL.	SIGJ I.O.	PROX. DET.	ERR. CAB.	T. VUE.	CORR. PLAN	M	ATRI
C2	0001		0001	01:58					38:48	00:17	2	
PR2	0002		0002	02:15					38:58	-00:08	1	
VR2	0003		0003	02:02					38:51	00:42	2	
M	0004		0004	02:28					38:40	00:00	0	
M	0004		0004	02:33					38:40	-00:04	0	
VR1	0005		0005	01:41					37:37	00:19	2	
PR1	0006		0006	01:52					37:47	00:27	2	
S1	0007		0007	02:52					38:25	-00:07	1	
S1	0008		0008	02:04					37:48	00:10		
F1	0009		0009	02:31					38:49	-00:30	0	
PR1	0010		0010	02:00					38:02	00:30	0	
DI1	0011		0011	02:23					00:31	0		
I	0012		0012	02:59					38:36	-00:14	0	
I	0013		0013	01:36					38:21	00:29		
PR2	0014		0014	02:52					38:29	00:00	2	
F2	0015		0015	02:03					38:21	00:03	2	
IV2	0016		0016	02:28					38:40	00:00	0	

S.I.R.A.T.

FALTAN TRENES

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

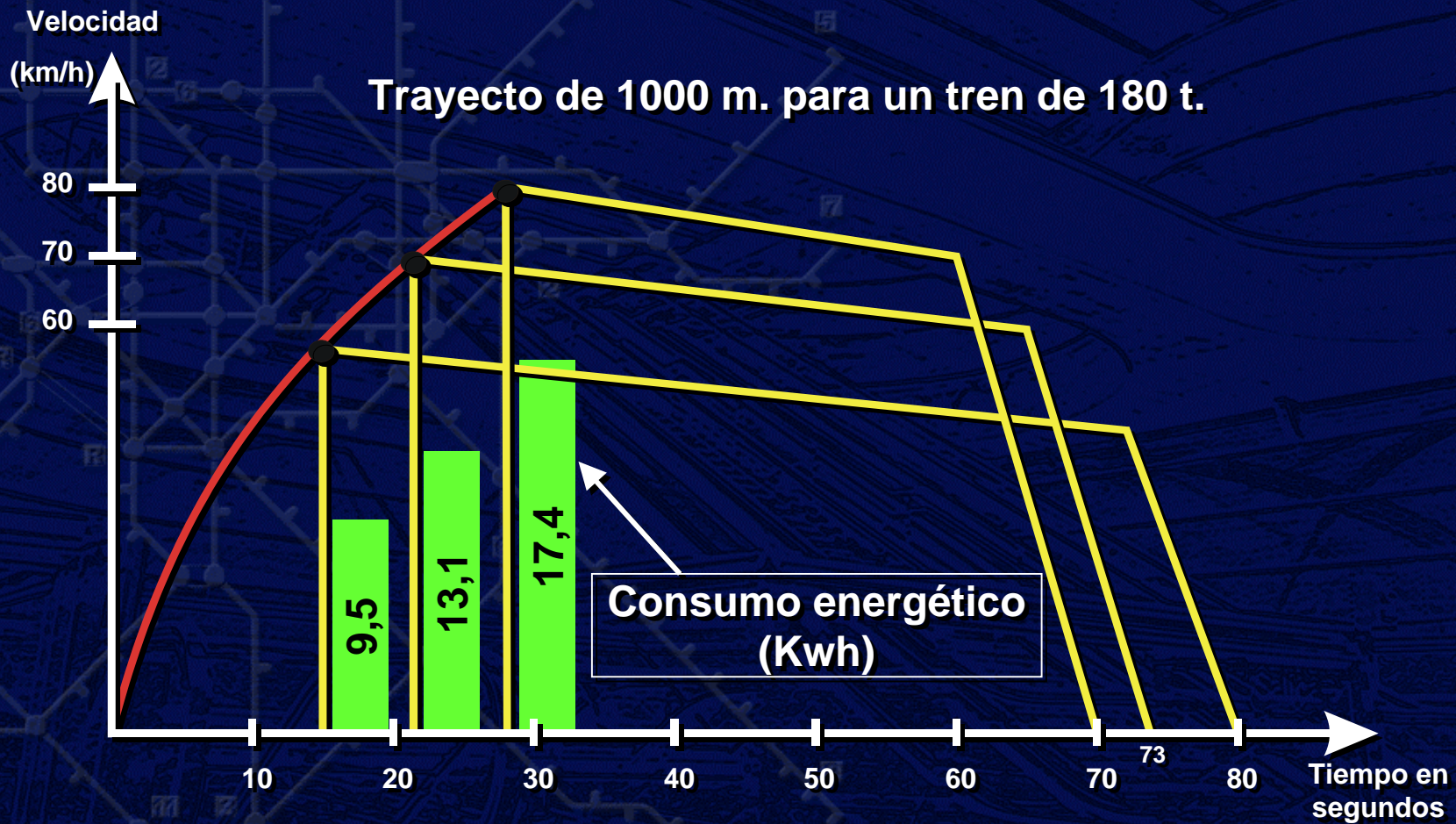


Mundo Metro S.A.



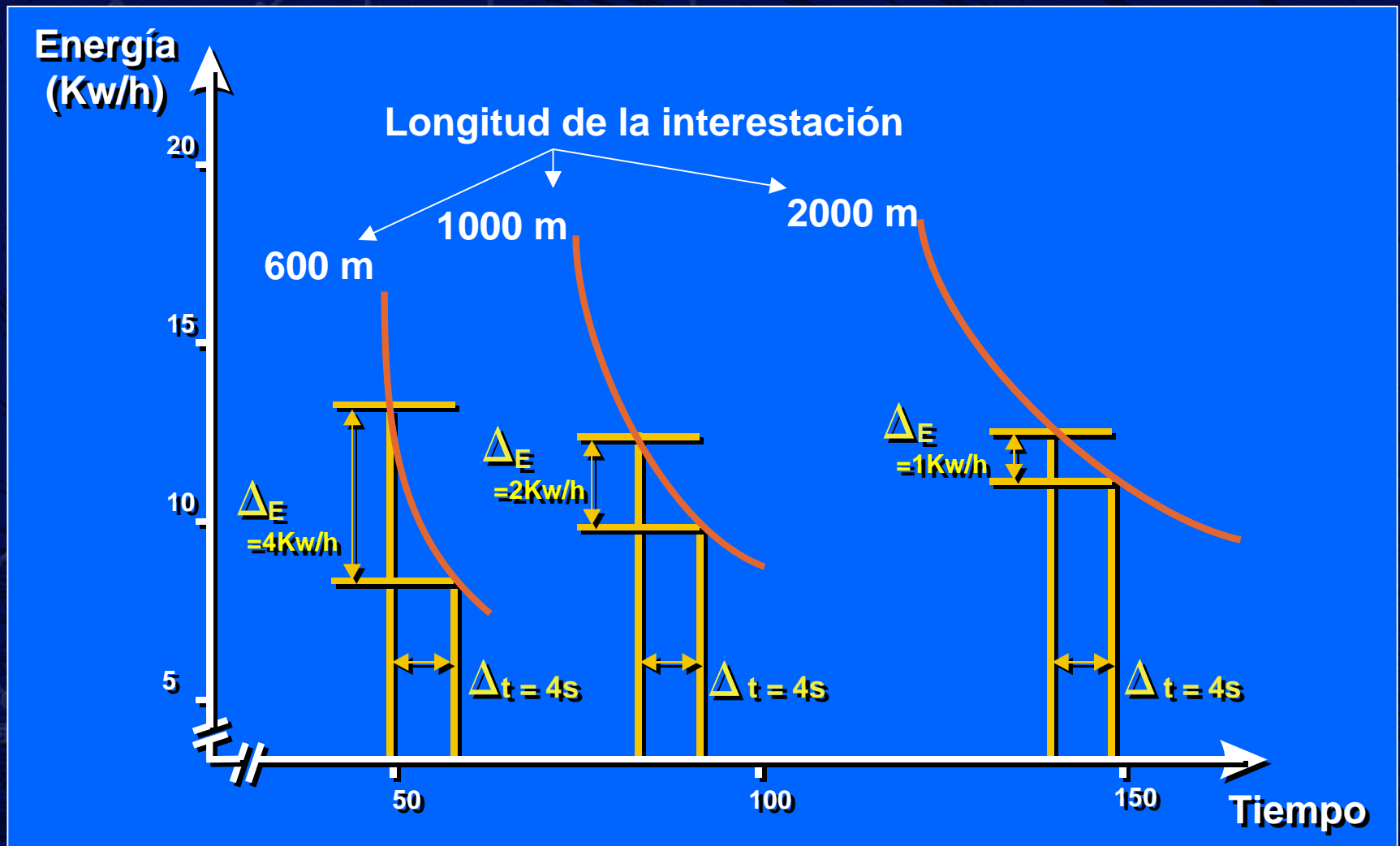


# Gráfica de consumos - Tiempo recorrido (1)





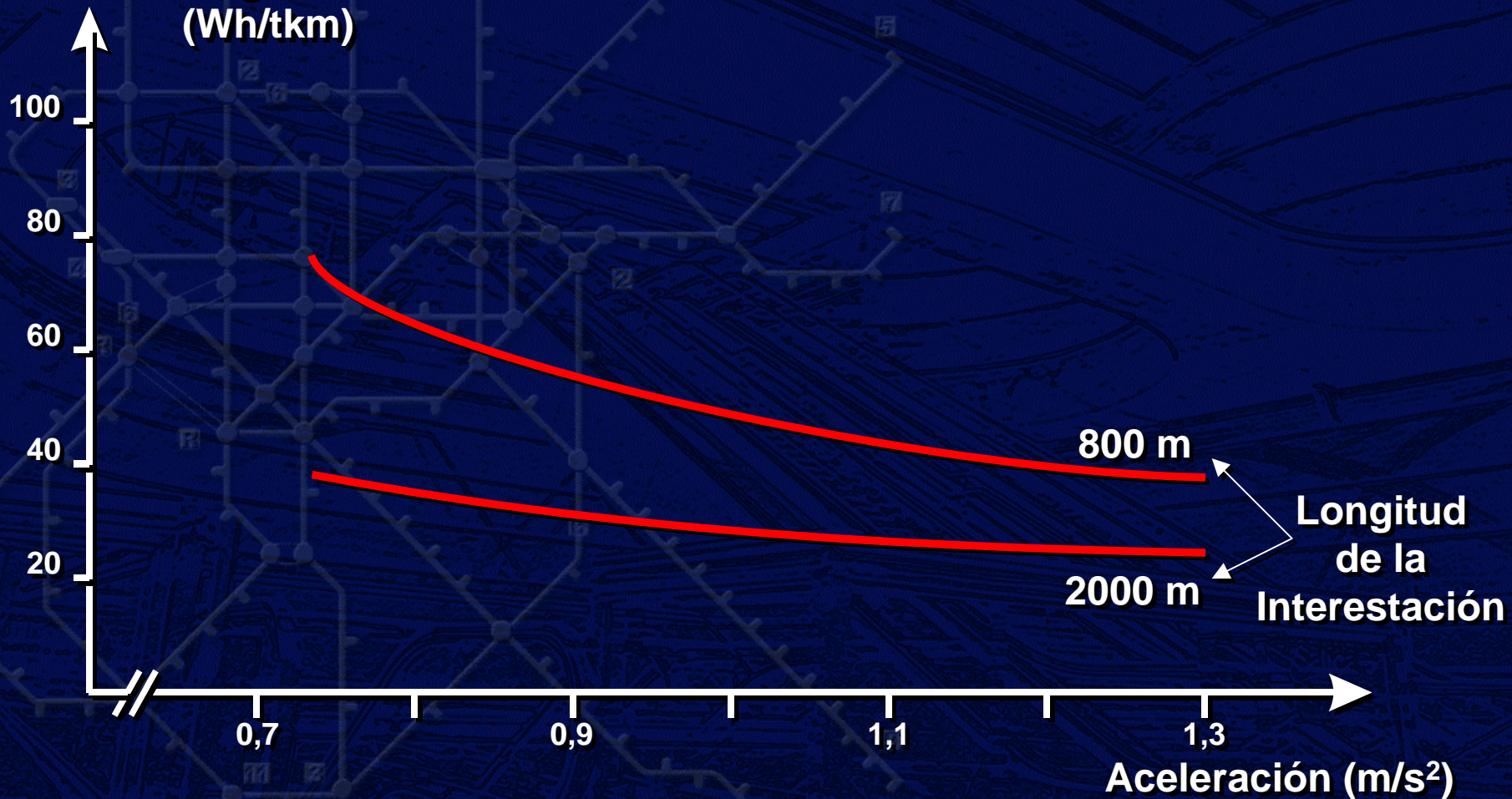
# Gráfica de consumos - Tiempo recorrido (2)





# Gráfica de consumos - Aceleración

Consumo energético  
(Wh/tkm)





# 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.

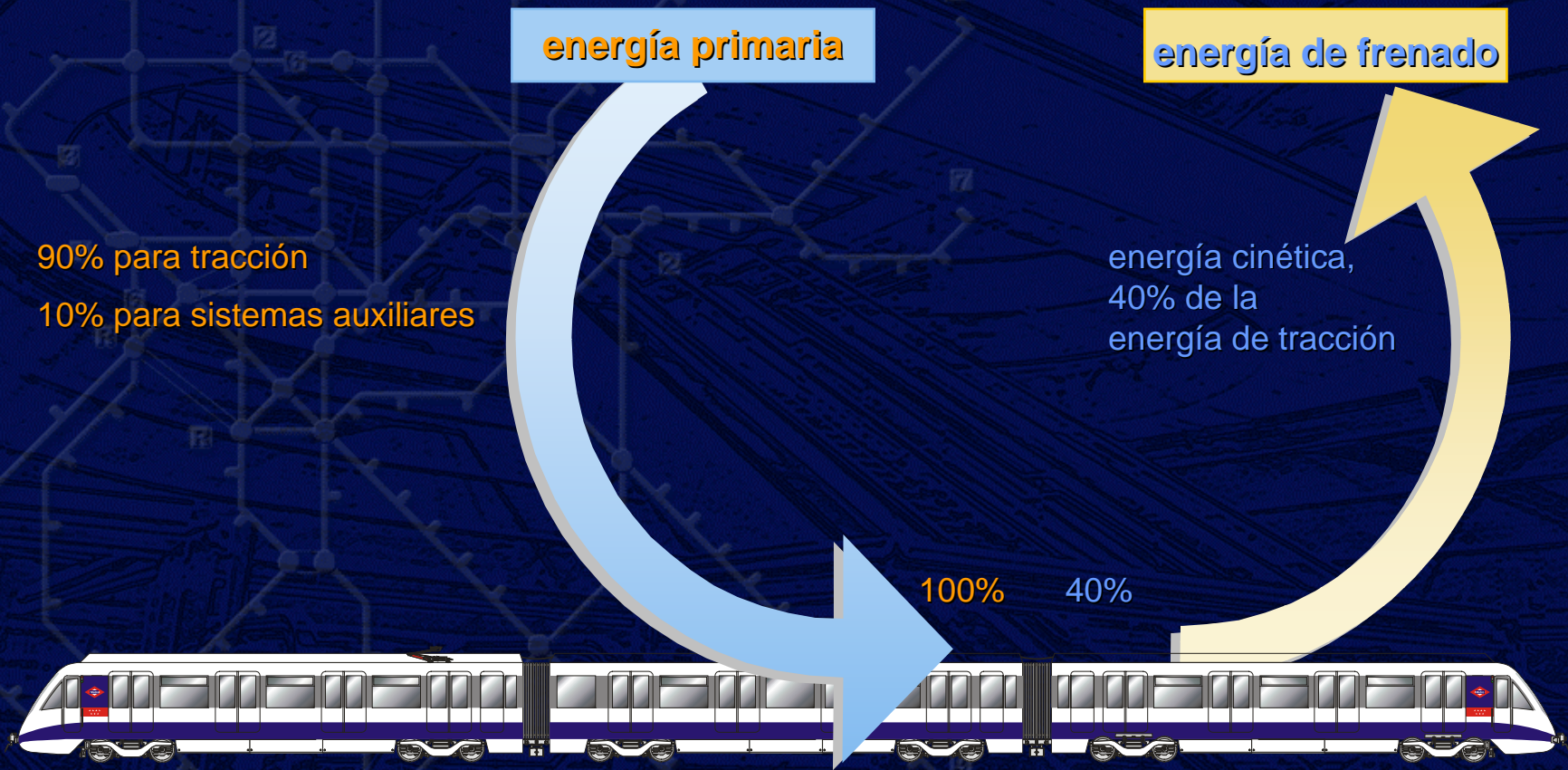
Contribuir a la protección del medio ambiente reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> en origen.





# 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.

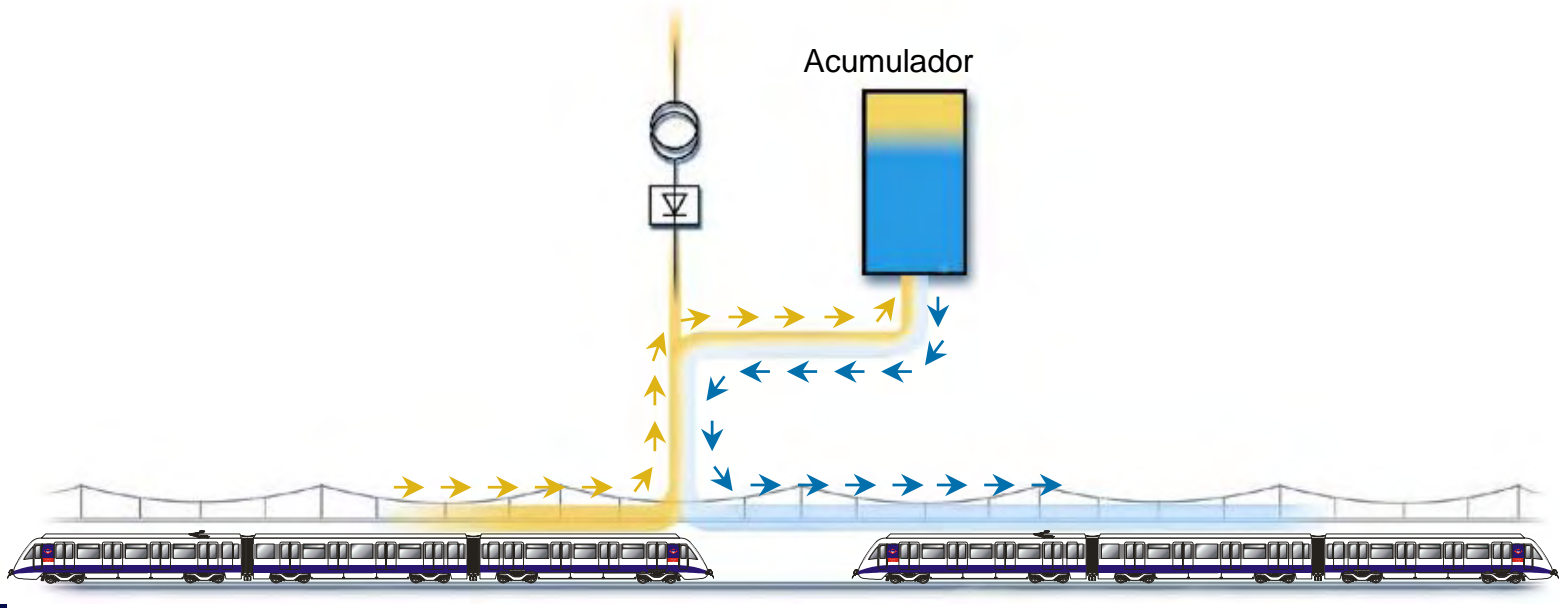




## Solución

## ANTECEDENTES

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

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

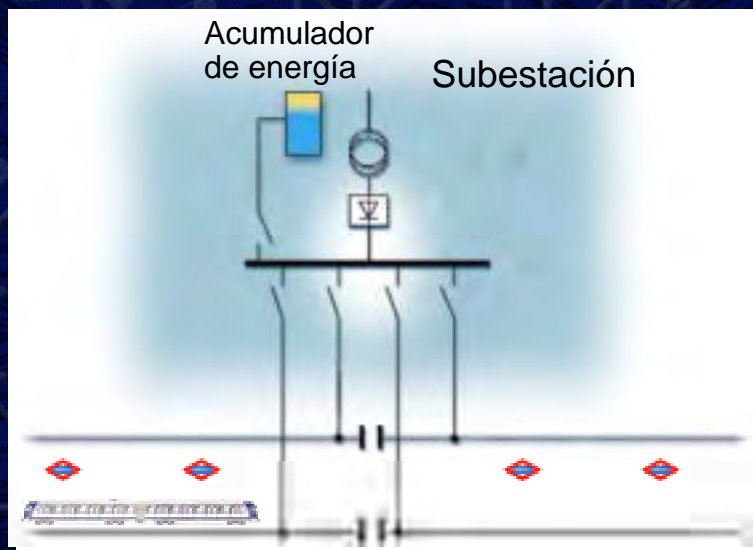
# ACUMULADORES DE ENERGÍA

## Propiedades

### REDUCCIÓN DE LA INVERSIÓN POR:

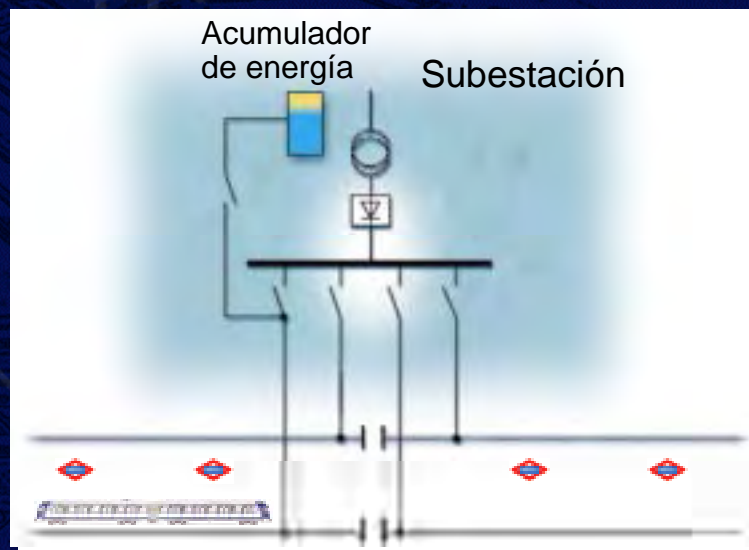
- Menor número de subestaciones
- Reducción de las pérdidas
- Optimización del uso de energía de frenado
- Reducción de picos de potencia

### 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 CO<sub>2</sub> (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





# ACUMULADORES DE ENERGÍA

## 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





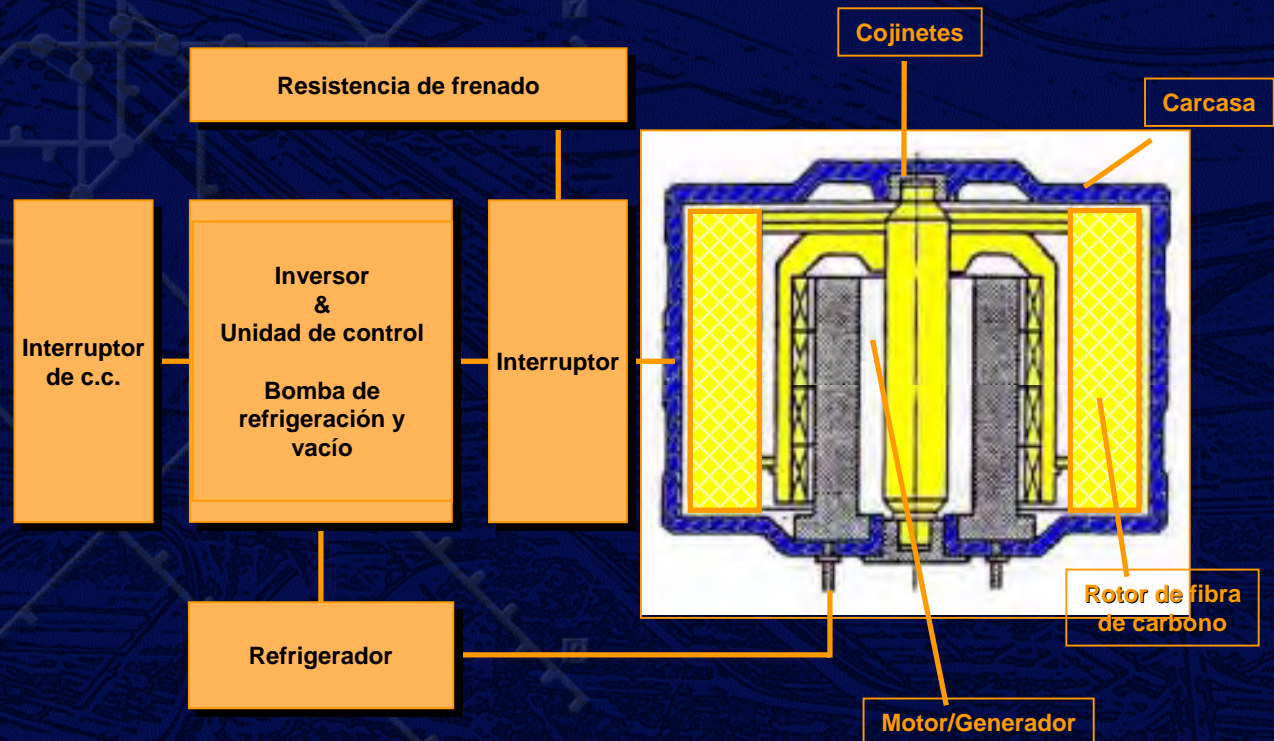
# ACUMULADORES DE ENERGÍA

## Sistemas rotativos

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

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

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





# ACUMULADORES DE ENERGÍA

## Sistemas rotativos

### Descripción del sistema

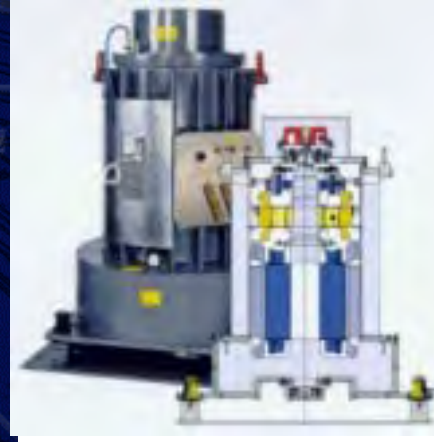
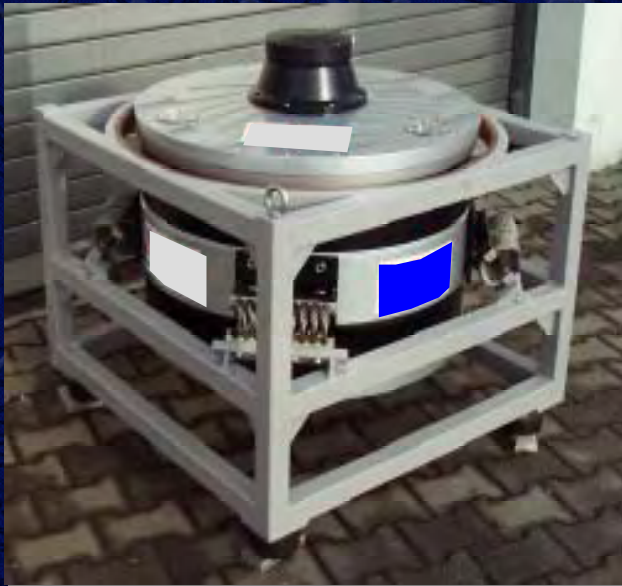
Existen varias soluciones tecnológicas basadas en este principio:

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

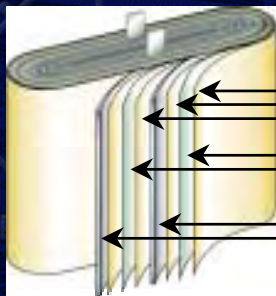
Sin mantenimiento en comparación al acumulador rotativo de energía

Contenido de energía escalable

### Datos técnicos

Tensión: 2,5 V

Capacidad: 2400 F

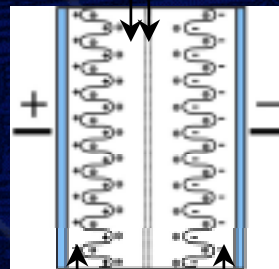


Derivación de Corriente

Electrodo de carbono

Separador

Electrolito Separador



Electrodos

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	+	-	○	+
Riesgo ambiental	-	+	+	○
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 CO<sub>2</sub>





# 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.



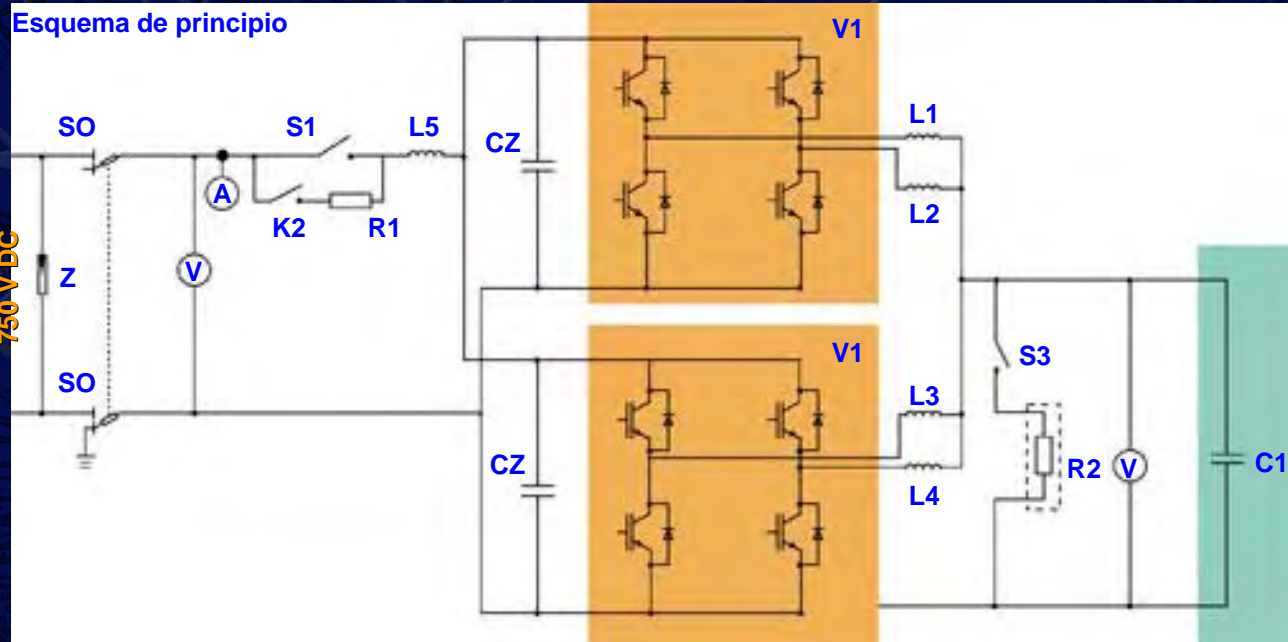


## APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

## 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.**



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 Características 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

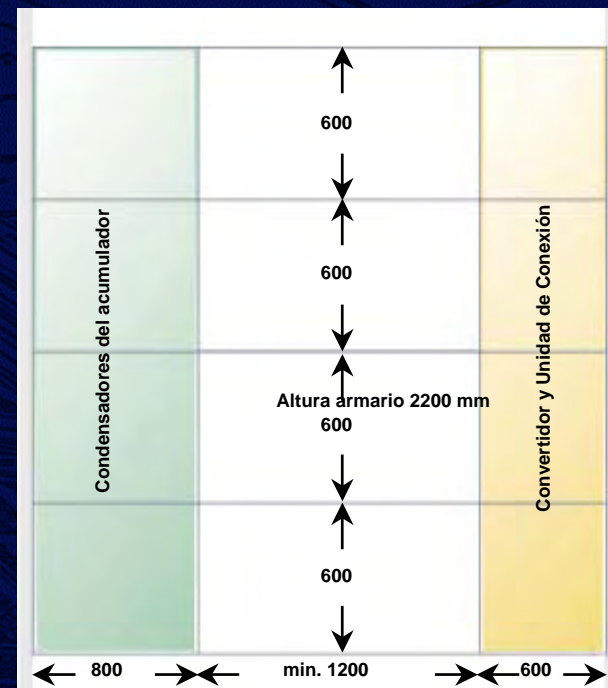




# APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

## Acumulador estático por condensadores Datos técnicos

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



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.

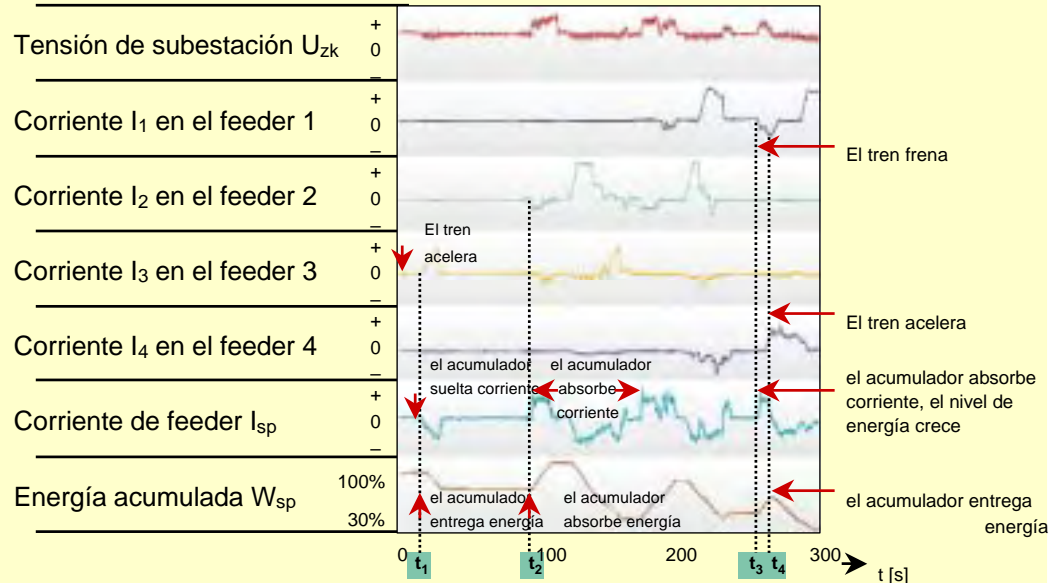
La respuesta dinámica del acumulador debe garantizar un intercambio óptimo de potencia con el sistema.

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.





# APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

## 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

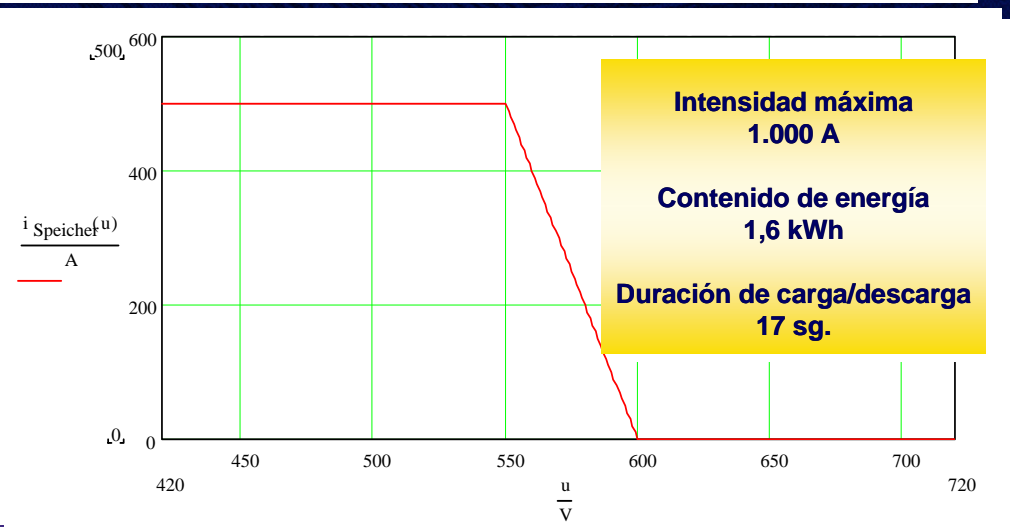
A la hora de dimensionar un acumulador, el contenido de energía y la corriente de descarga del acumulador deben combinarse de forma óptima

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.



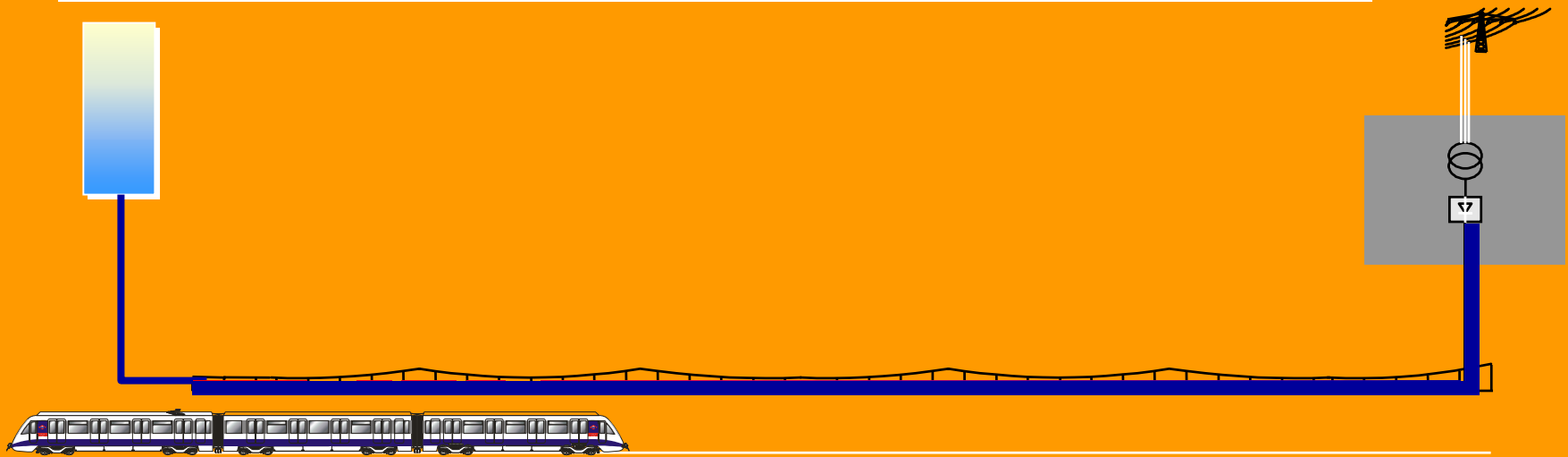


# APLICACIÓN EN METRO DE MADRID

## Soporte de tensión estimado

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

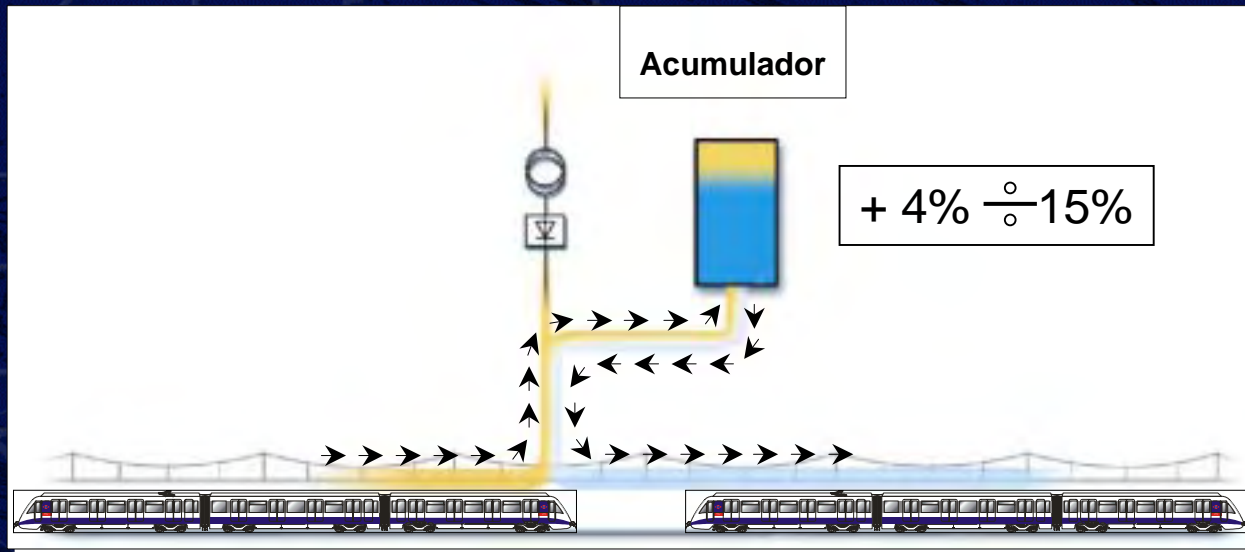
Mediante simulación informática se obtiene que la instalación del acumulador podría elevar la tensión en ese punto en 25 V (aprox. 20% de reducción de la caída de tensión).





# 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

