

PLAN DE AHORRO ENERGÉTICO (P.A.E) METRO de MADRID



Plan de Ahorro Energético (P.A.E)

- 1.- Antecedentes
- 2.- Ámbitos de actuaciones del PAE
- 3.- Medidas de acción del PAE
- 4.- Ahorro consumo de tracción
- 5.- Ahorro consumo de estaciones
6. Conclusiones



1.- Antecedentes

Metro de Madrid, presentó en **Mayo de 2012** un ambicioso **Plan de Ahorro Energético** en busca de la excelencia en la gestión de los recursos de todos los madrileños buscando optimizar el uso eficiente de la energía en la extensa red de Metro.

El PAE, es diseñado y desarrollado íntegramente por medios propio de Metro de Madrid, donde se identificó un conjunto de acciones combinadas para obtener un ahorro energético global y reducir la facturación energética.

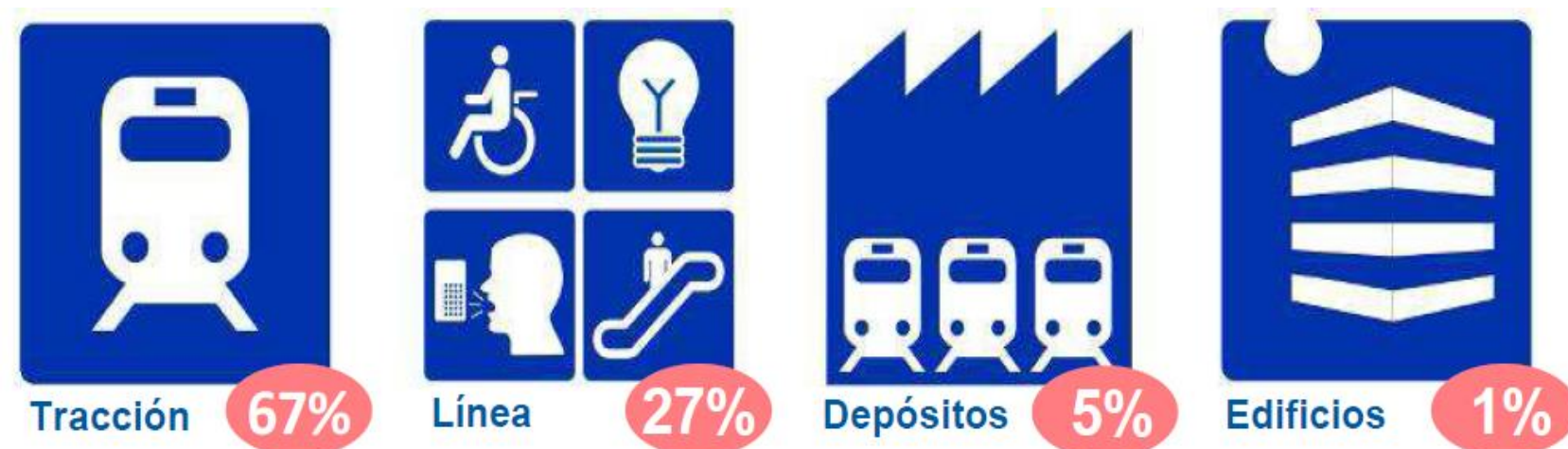
Este proyecto es el resultado de un proceso combinado, incluyendo aspectos teóricos y prácticos, aplicados a las características de Material Móvil, Instalaciones de energía y de explotación ferroviaria existentes las estaciones y túneles, para mantener o mejorar los niveles de calidad de servicio, minimizar la inversión y mejorar la sostenibilidad medioambiental y la eficiencia del transporte público.

2.- Ámbitos de actuación del PAE

El **Plan de Ahorro Energético** se divide en tres ámbitos globales de actuación:

- **TRACCIÓN:** optimización del consumo de tracción y aumento de la regeneración.
- **ILUMINACIÓN** Optimización del consumo energético implantando tecnología LED en estaciones y trenes.
- **CONFORT:** racionalización de los criterios de climatización y ventilación de estaciones y túneles.

Distribución consumo energético



El consumo energético 2012 (antes PAE):

713.218.827 kWh/año



Consumo equivalente a todos los hogares de una ciudad del tamaño de Zaragoza

2.- Ámbitos de actuación del PAE: TRACCIÓN



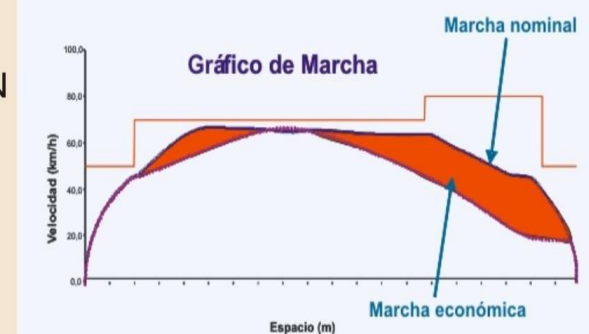
**REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE
POTENCIA CONSTANTE**
MODIFICACIÓN DE LA ACCELERACIÓN

OPTIMIZAR
MODELO DE
PROPULSIÓN
MATERIAL
MÓVIL



2419 Coches
173 Mkm/año

IMPLANTACIÓN
DE MARCHAS
ECONÓMICAS
EN
CONDUCCIÓN
AUTOMÁTICA



**MEJORA DE CAPTACIÓN
DE ENERGÍA**

ELIMINACIÓN
DE
IMANES
DE VÍA

TRACCIÓN

CROSS-
BONDING



**MAYOR APROVECHAMIENTO DE
ENERGÍA DEVUELTA AL TREN**



REDUCCIÓN
TENSIÓN DE
SALIDA Y
DESCONEXIÓN
EN
HORA
VALLE



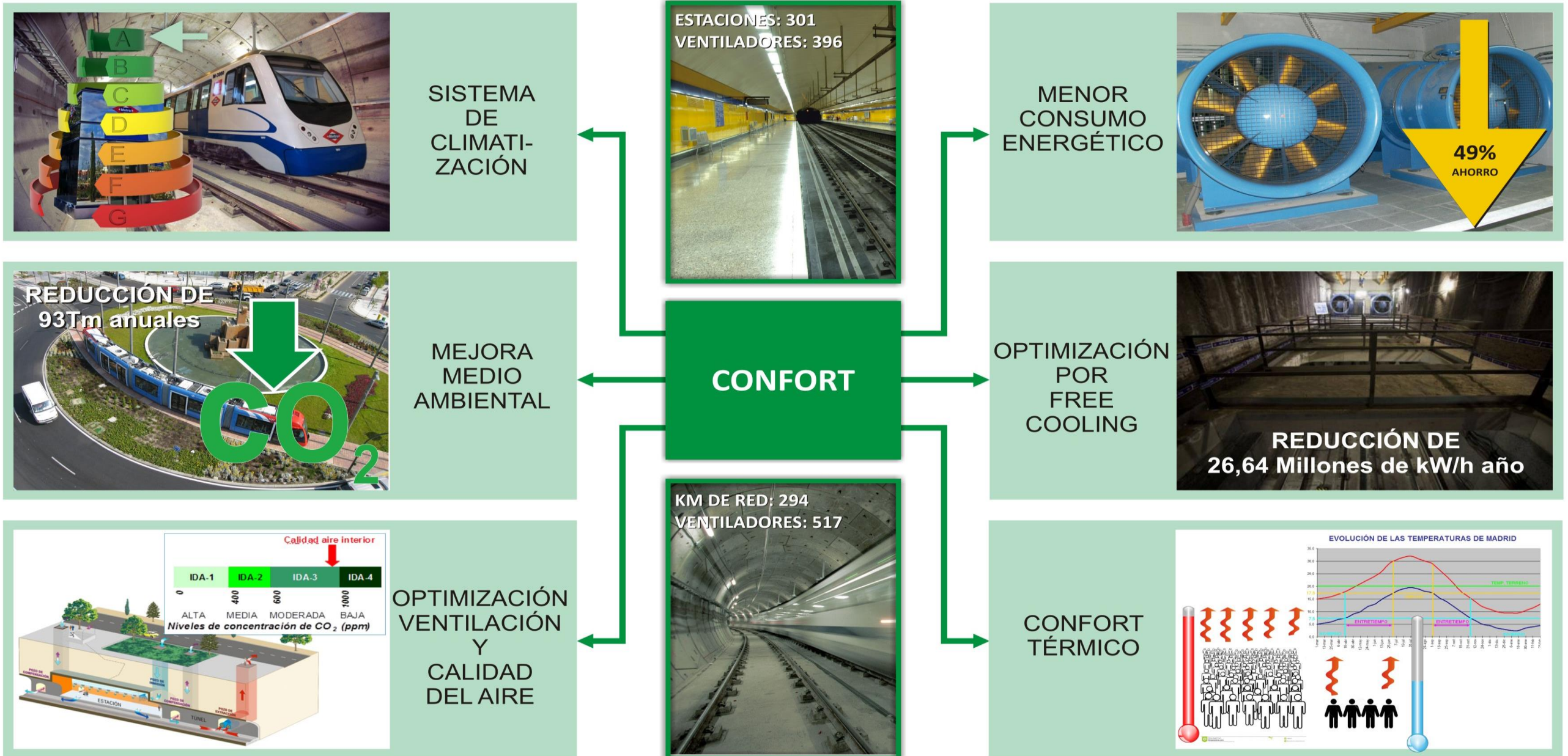
CENTRO
DE
TRACCIÓN
REVERSIBLE



2.- Ámbitos de actuación del PAE: ILUMINACIÓN

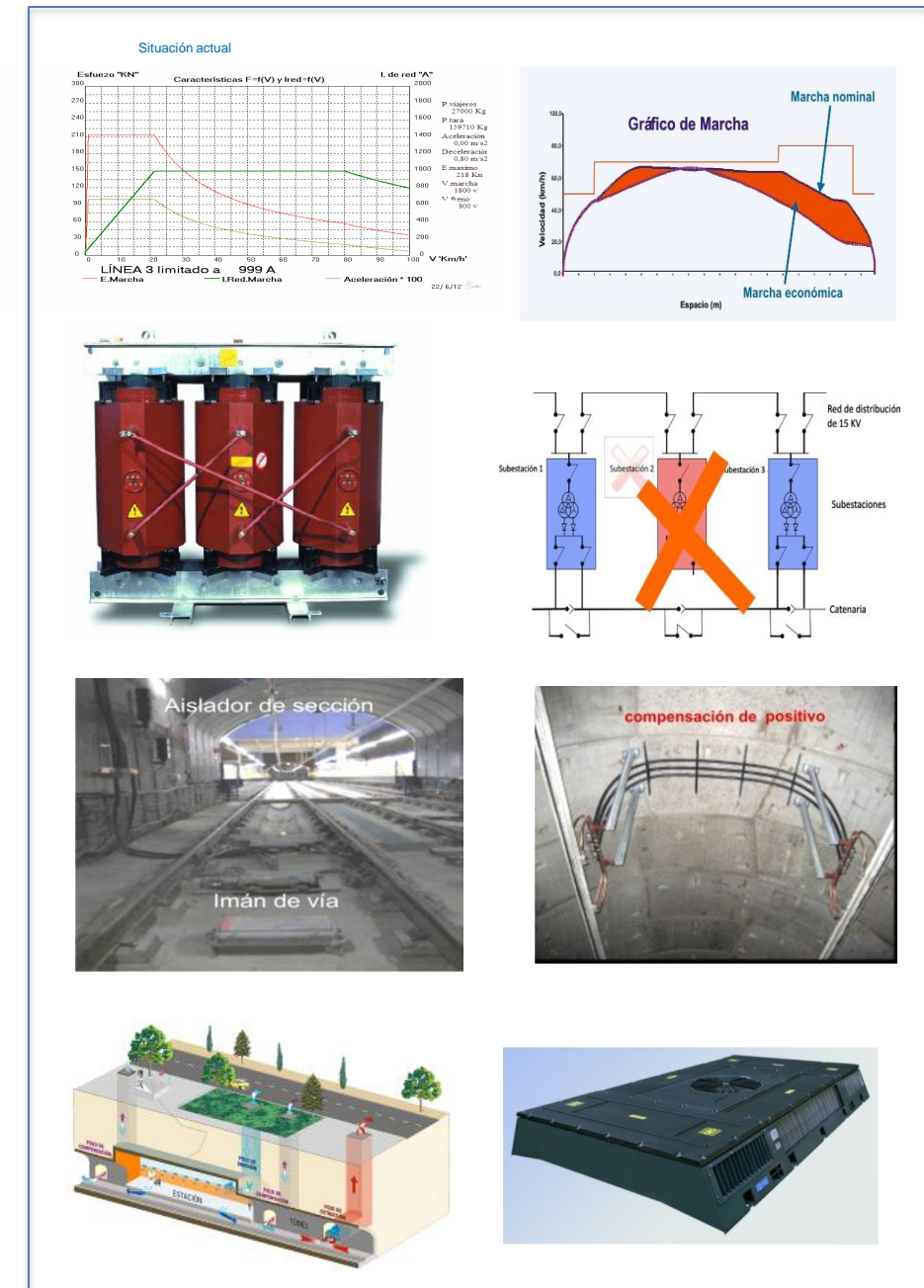


2.- Ámbitos de actuación del PAE: CONFORT



3.- Medidas de acción del PAE

1. **Acción_01:** Optimización del Modelo de Propulsión del Material Móvil
2. **Acción_02:** Implantación de marchas económicas en conducción automática.
3. **Acción_03:** Desconexión de subestaciones eléctricas en hora valle.
4. **Acción_04:** Reducción de la tensión de salida de subestaciones eléctricas.
5. **Acción_05:** Cross-bonding.
6. **Acción_06:** Eliminación de imanes de vía.
7. **Acción_07:** Instalación de subestaciones reversibles..
8. **Acción_08:** Implantación de alumbrado LED estaciones y trenes.
9. **Acción_09:** Optimización de la climatización en el Material Móvil.
10. **Acción_10:** Optimización de la ventilación de estaciones y túneles.



3.- Acción_01: Optimización del Modelo de Propulsión del Material Móvil

Ámbito:

Las curvas de tracción del Material Móvil (curvas características) son diseñadas para definir el régimen cinemático del mismo (espacio, velocidad y aceleración en función del tiempo).

La energía consumida asociada a cada curva característica puede ser corregida modificando dicho régimen cinemático mediante la definición de nuevas curvas de esfuerzo tracción/freno.

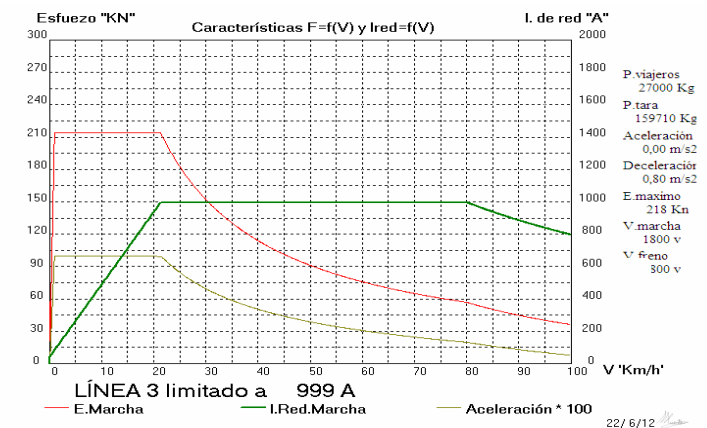
Descripción de la Acción:

Modificación de las curvas del Material Móvil para reducir el consumo energético asociado.

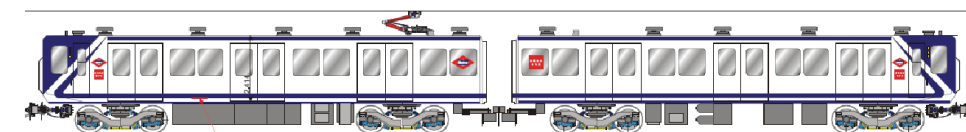
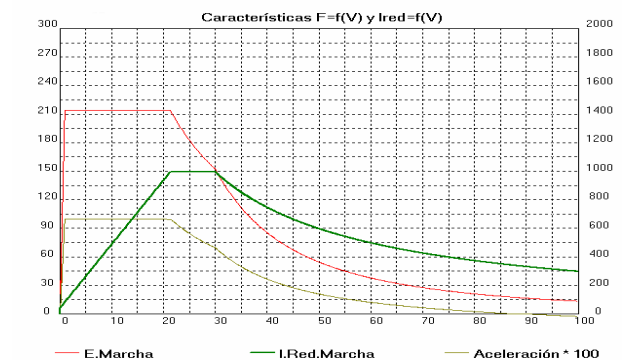
Los parámetros modificaos han sido:

- Reducción del tiempo de potencia constante.
- Modificación de la aceleración.

Situación actual



Situación propuesta



3.- **Acción_02:** Implantación de marchas económicas en conducción automática.

Ámbito:

El sistema de conducción automática del Material Móvil, denominado ATO, determina el perfil de velocidades que desarrolla una unidad tren entre dos estaciones, en base a parámetros de tiempo, velocidad, distancia, perfil y prestaciones de los trenes.

Existen diversas marchas de conducción que determinan el tiempo de recorrido y la conducción entre estaciones. Las diversas marchas (tendida y económicas) gestionan el consumo energético mediante el ajuste de la deceleración y de las velocidades de deriva y remotor.

Descripción de la Acción:

Diseño del modelo de marchas económicas para la operación eficiente de las líneas en hora valle, maximizando el ahorro energético mediante la aplicación de órdenes de deriva, velocidad de remotor y parábolas de freno reducidas, gestionando tiempos de recorrido y tiempos de parada en estación.



3.- Acción_03: Desconexión de subestaciones eléctricas en hora valle.

Ámbito:

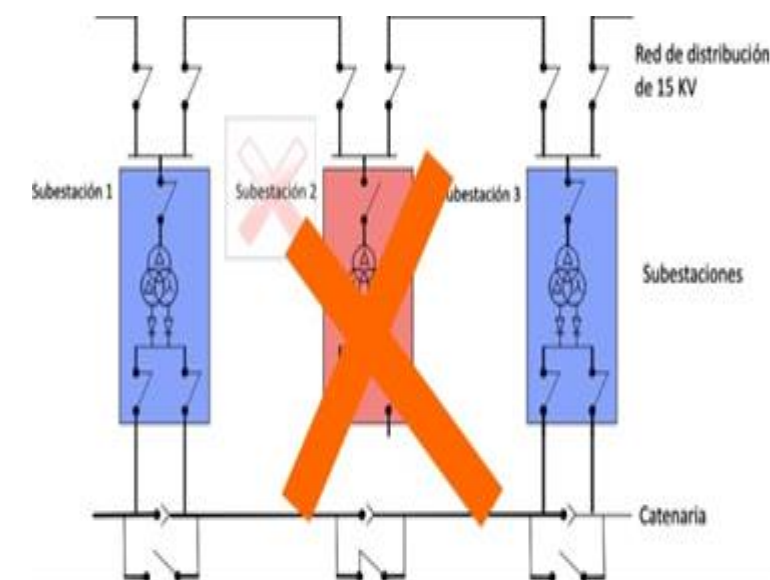
Las subestaciones eléctricas proporcionan energía al sistema de transporte (tracción de trenes y servicios auxiliares) y a los sistemas de explotación existentes, mientras que los trenes disponen de la capacidad de devolver energía durante la fase de frenado (freno regenerativo) en la que los motores actúan como generadores, devolviendo a la catenaria la energía cinética acumulada.

Para devolver la energía, la tensión de regeneración del tren debe superar la tensión de catenaria, por lo que ésta deberá ser lo más baja posible dentro de los márgenes de normativa.

Descripción de la Acción:

Desconexión de determinadas subestaciones eléctricas en hora valle, en función de la tabla de trenes y de la demanda de energía.

Cuando se desconecta una subestación en hora valle, el tramo afectado es alimentado por las subestaciones colaterales generándose una bajada de tensión, siendo ésta más acusada en las proximidades de la subestación desconectada. Esta acción requiere la ejecución de maniobras (apagado/encendido) en la operativa diaria del Puesto de Mando.



3.- **Acción_04:** Reducción de la tensión de salida de subestaciones eléctricas.

Ámbito:

Para el óptimo aprovechamiento de la energía regenerada, la tensión en catenaria no debe ser elevada. Los transformadores de tracción son los encargados de reducir la tensión de entrada en la subestación a un valor tal que, una vez rectificado y convertido a corriente continua, permita alimentar a la catenaria a la tensión adecuada.

Los transformadores instalados en las subestaciones están equipados con tomas de regulación, que permiten cambiar la relación de transformación y ajustar el valor de tensión de salida al valor deseado, con un margen de regulación de $\pm 5\%$ respecto a la tensión nominal.

Descripción de la Acción:

Se ha reducido la tensión nominal de salida de las subestaciones de tracción actuando sobre las tomas de regulación de sus transformadores, incrementando así la capacidad de regeneración del Material Móvil.

Esta acción produce un nuevo reparto de cargas en la línea de cateneria, generando una transferencia de energía hacia las subestaciones cercanas a las que se aplica la medida.



3.- Acción_05: Cross-bonding.

Ámbito:

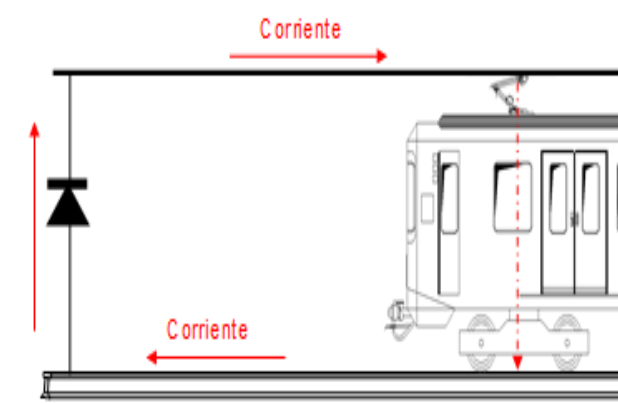
La energía eléctrica que demanda el Material Móvil fluye desde las subestaciones eléctricas, siendo transportada por la catenaria hasta el tren retornando por los carriles de la vía. Con la instalación de compensaciones, se consigue un mejor aprovechamiento de la energía al disminuir la caída de tensión.

Descripción de la Acción:

Se produce la regeneración en el Material Móvil mediante la reducción de los caminos eléctricos tanto en la catenaria (compensación de positivo) como en el carril (compensación de negativo) entre ambas vías, para encontrar posibles consumidores (trenes y/o subestaciones reversibles), con la consiguiente reducción de pérdidas por caídas de tensión.

Con ello se obtienen los siguientes efectos:

- Aumento de la sección efectiva de la línea, reduciendo la resistencia de la misma.
- Mayor aprovechamiento de la energía devuelta durante el proceso de frenado del tren, al aumentar el número de caminos posibles hacia potenciales consumidores.



3.- Acción_06: Eliminación de imanes de vía.

Ámbito:

La línea aérea está dividida en sectores de tracción separados de sus colaterales mediante elementos denominados aisladores de sección, los cuales pueden ser de dos tipos: aisladores de sección con zona neutra y sin zona neutra.

Para mejorar la captación de energía, al paso del tren, por un aislador de sección sin zona neutra existen elementos en la vía, denominados imanes de vía, que inhiben la tracción/frenado regenerativo del Material Móvil.

Los imanes suelen encontrarse en las entradas a las estaciones, momento en el que se produce el frenado, por lo que se impide el correcto aprovechamiento de la totalidad de la energía de frenado regenerativo del Material Móvil.

Descripción de la Acción:

Incrementar la ventana de tiempo en la que un tren puede regenerar energía en su proceso de frenado, mediante la modificación de los aisladores de sección y la retirada de los imanes correspondientes.

Esta acción requiere modificaciones en los elementos de la línea aérea y la retirada de equipos en la plataforma de vía.



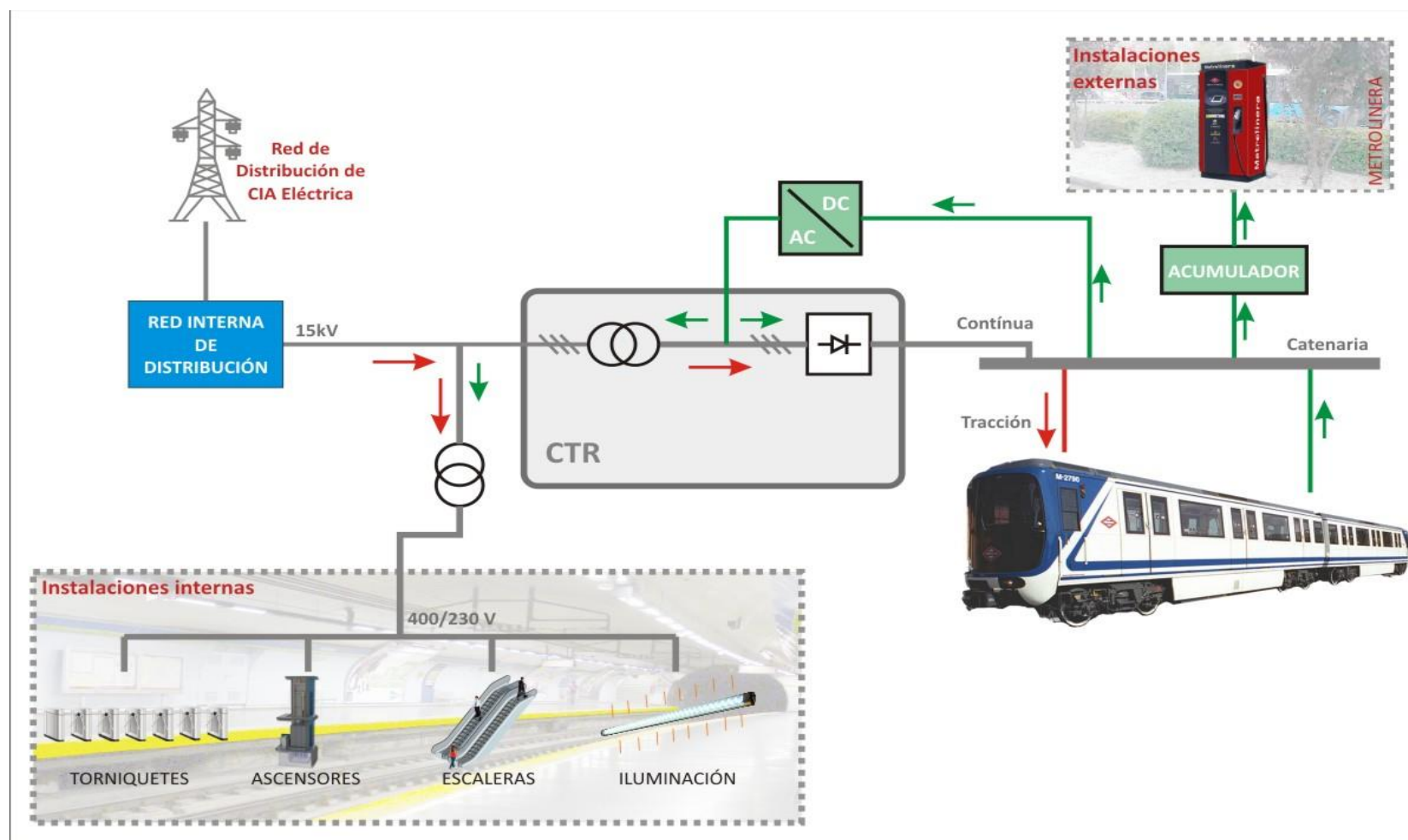
3.- Acción_07: Instalación de subestaciones reversibles .

Ámbito:

La energía regenerada por el Material Móvil como consecuencia de su frenado, puede ser utilizada por otros trenes, por otras subestaciones o por otras instalaciones de explotación que se alimenten de la red de distribución interna y externa.

Descripción de la Acción:

Inyectar la energía regenerada por el Material Móvil en la red de distribución interna de 15kV evitando su pérdida en forma de calor y utilizarla para otros consumidores internos (escaleras mecánicas, ascensores, sistemas de ventilación, etc.) e incluso externos (metrolineras)..



3.- **Acción_08:** Implantación de alumbrado LED estaciones y trenes.

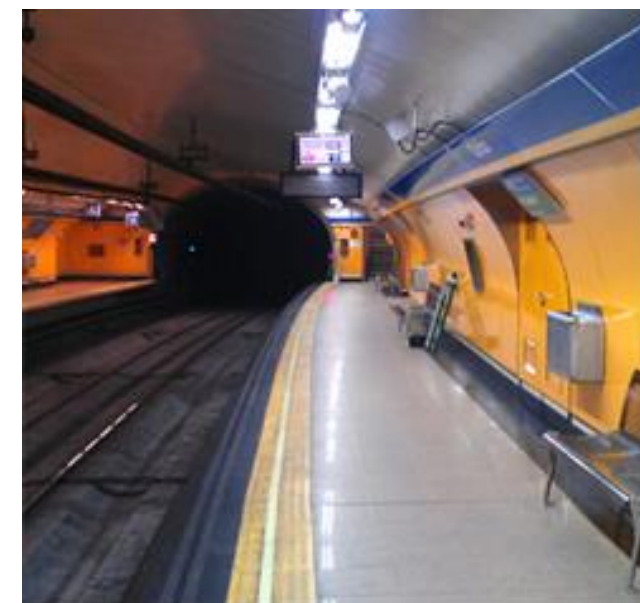
Ámbito:

La iluminación de las estaciones, depósitos y oficinas constituye una partida importante del consumo eléctrico. Actualmente, hay más de 330.000 tubos fluorescentes instalados en las estaciones y de 48.970 tubos en trenes con un número de horas de funcionamiento anuales de más de 17.000.

Descripción de la Acción:

Sustitución de las luminarias actuales por nuevas tecnologías de iluminación (LED, Inducción y/o fluorescencia de alto rendimiento) con ahorros energéticos superiores al 50% manteniendo la misma luminosidad, respuesta rápida de encendido, apagado o cambio en la emisión de luz.

Con esta acción se optimiza el mantenimiento preventivo requerido para el sistema de alumbrado. El sistema de alumbrado original requiere la revisión de componentes cada año y medio, mientras con la tecnología LED este mantenimiento se traslada a los 5 años. Esto supone un ahorro económico de mano de obra y de materiales. El aumento de la vida útil evita residuos y mejora la sostenibilidad-



3.- Acción_09: Optimización de la climatización en el Material Móvil.

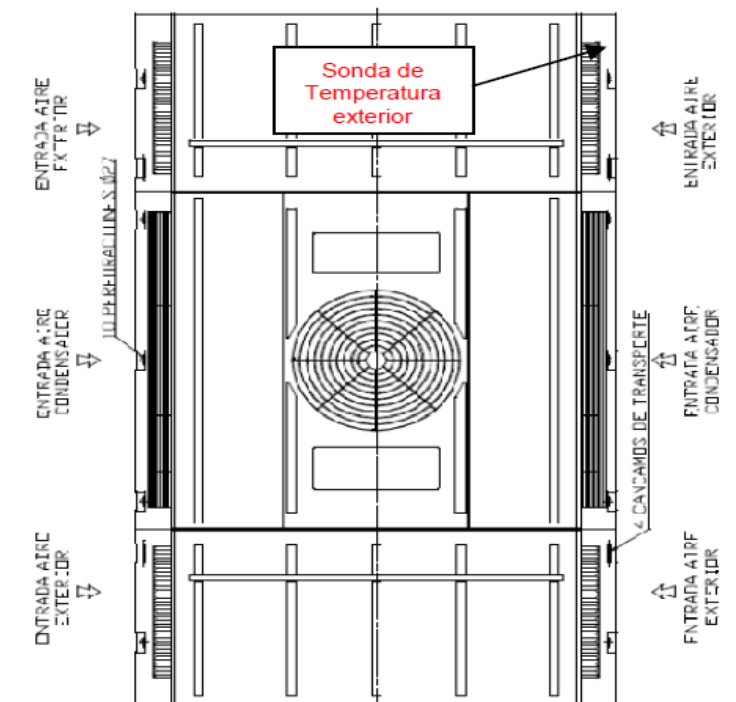
Ámbito:

Los procesos de climatización del recinto de viajeros del Material Móvil contemplan los modos de funcionamiento de calefacción, ventilación y aire acondicionado. El modo habitual de funcionamiento se establece mediante una curva de confort en la cual se consideran diversas variables como son la temperatura exterior o la del recinto de viajeros, entre otras.

Esta medida tiene por objetivo optimizar el funcionamiento de los equipos de climatización del material móvil minimizando el consumo energético mediante la modificación de las curvas de enfriamiento dentro de unos rangos prefijados en función del periodo invierno/verano, y conforme a la normativa aplicable y parámetros de confort.

Descripción de la Acción:

- Incorporación baterías condensadoras compartidas (aumento rendimiento disipación, 20% rendimiento global del equipo)
- Modificación software regulación (dos circuitos simultáneos, gestión protección térmica compresor, parada compresores por control, curvas de regulación eficientes según necesidades del servicio, aumento vel. evaporadoras para conseguir más caudal, consigna fija en intemperie, eliminación reheating).
- Modificación hardware para poder cambiar posición conmutador
- Nueva bancada compresores (mayor potencia, mejor COP, menor peso y ruido y solución a problema de obsolescencia)



3.- Acción_10: Optimización de la ventilación de estaciones y túneles.

Ámbito:

Los sistemas de ventilación de túnel y de estación tienen por objeto el control térmico y la salubridad del aire en la red de explotación de Metro de Madrid. El objetivo de esta acción ha sido diseñar y poner en explotación una nueva política de funcionamiento y optimización del sistema de ventilación de túnel y de estación de la red de explotación priorizando:

- El ahorro energético para mejorar la sostenibilidad medioambiental.
- Crear unas adecuadas condiciones de salubridad, aportando aire fresco (exterior).
- Crear unas adecuadas condiciones de confort, mediante la disipación de la carga térmica.
- Poder controlar los humos producidos por un incendio incipiente u otro tipo de emergencia.

Descripción de la Acción:

Los sistemas de ventilación de túnel tienen por objeto la eliminación de la carga térmica que se produce en la instalación y asegurar la salubridad del aire en estaciones mediante la aportación de aire fresco. El sistema de ventilación de túnel es, después del sistema de tracción de trenes, el mayor consumidor de energía en una explotación ferroviaria subterránea como la de Metro de Madrid.

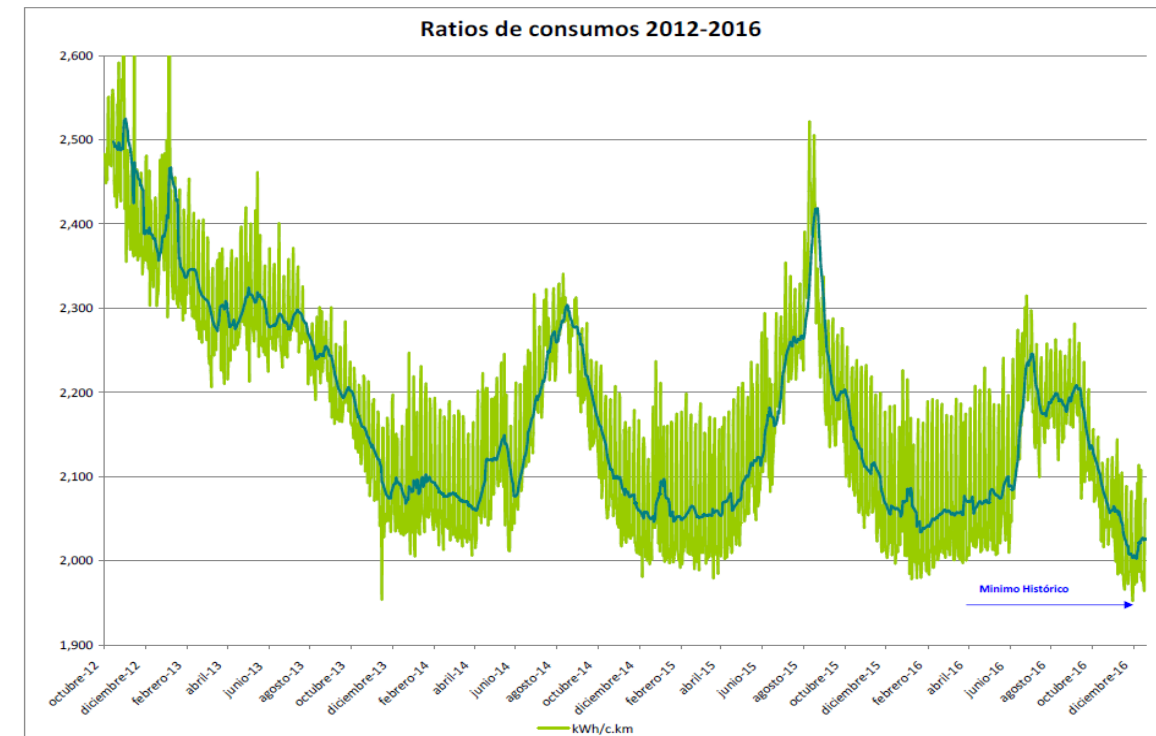
Esta acción ha establecido una estrategia que permite ventilar cuando el salto térmico entre interior y exterior sea máximo y/o cuando el coste energético sea menor, asegurando la salubridad del ambiente. Asimismo se han aplicado técnicas de free-cooling en las estaciones para el enfriamiento gratuito.



ESQUEMA DE INSTALACIÓN TIPO DE VENTILACIÓN DE METRO DE MADRID

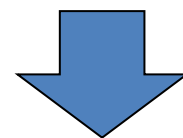
4.- Ahorro consumo de tracción

| Año | Tracción (kWh) | Ahorro frente a 2012 (kWh) | Ahorro frente a 2012 en CO2 (0,521 kg CO2/kWh) | Ahorro € frente a 2012 (0,11€/kWh) |
|-------|----------------|----------------------------|--|------------------------------------|
| 2.012 | 466.749.887 | | | |
| 2.013 | 384.288.221 | 82.461.666 | 42.962.528 | 9.070.783,26 € |
| 2.014 | 361.473.546 | 105.276.341 | 54.848.974 | 11.580.397,51 € |
| 2.015 | 363.771.296 | 102.978.591 | 53.651.846 | 11.327.645,01 € |
| 2.016 | 376.422.114 | 90.327.773 | 47.060.770 | 9.936.055,03 € |



El consumo 2012 (antes PAE):

466.749.887 kWh/año



**AHORRO
(18,36%)**

Ahorro Acumulado (hasta 2016):

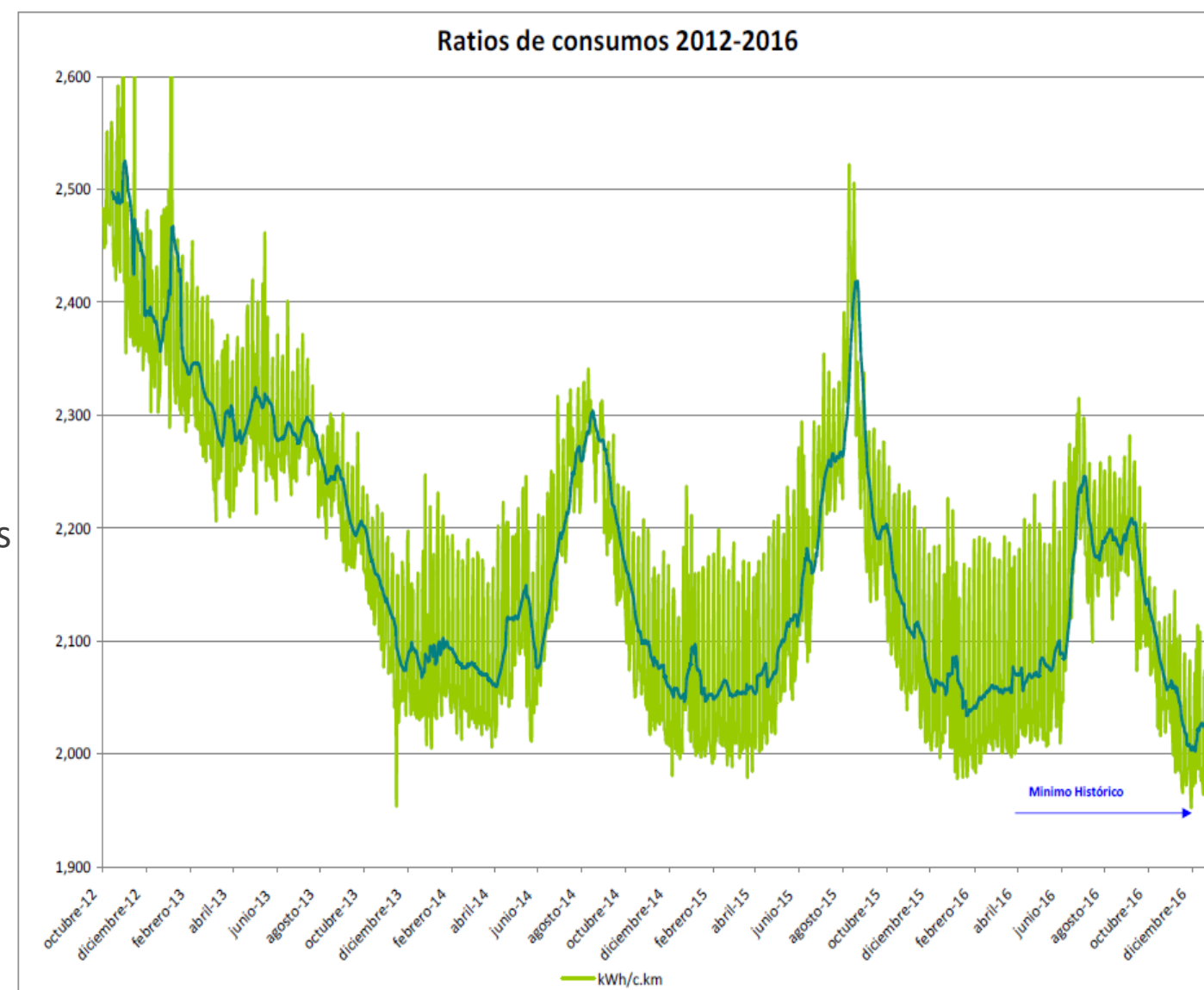
381.044.371 kWh/año

• **Ratios de consumo del material móvil (kWh/coches x km):**

- inicio PAE: **2,5 kWh/cxkm**
- Año 2016: **2 kWh/cxkm**

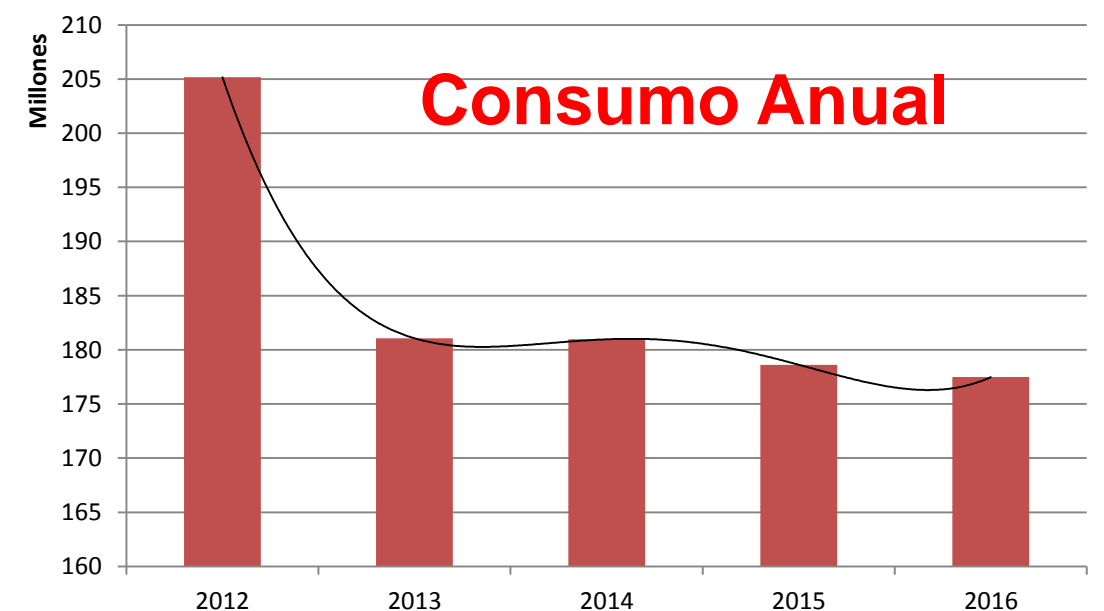
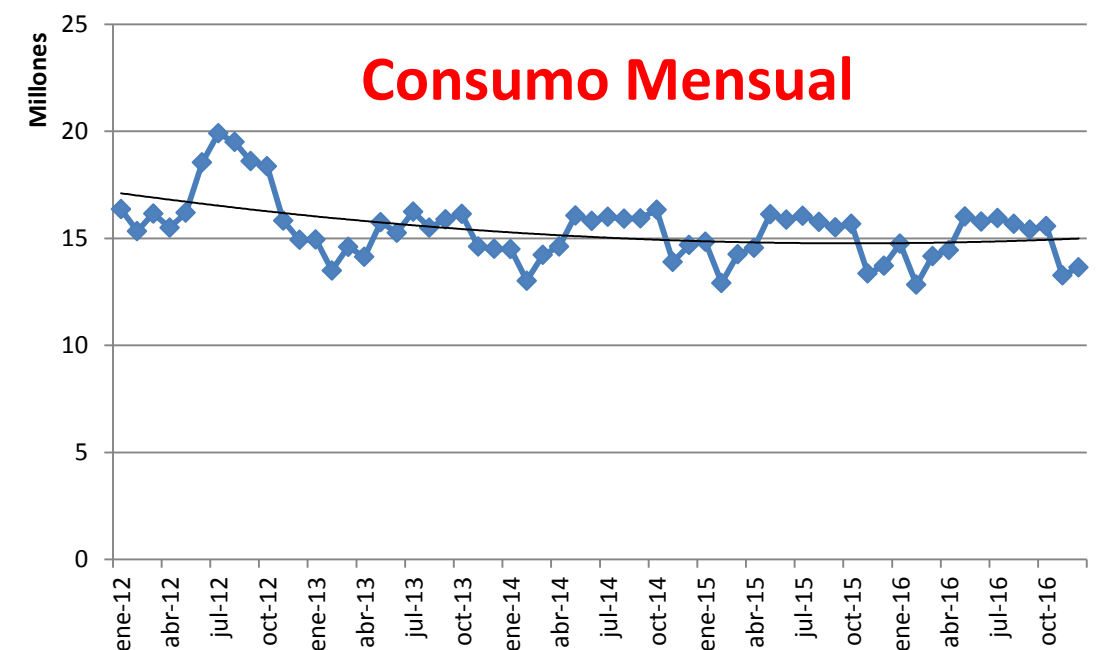
4.- Ahorro acumulado tracción

- **381.04 millones de kWh**, con una media anual de 95,26 millones de kWh.
- **198.524 toneladas CO₂**, con una media anual de 49.631 toneladas de CO₂
- **92,97 toneladas SO₂**, con una media anual de 23,24 toneladas de SO₂
- **34,34 toneladas NO_x**, con una media anual de 8,59 toneladas de Nox
- **41,91 MM€**, con una media anual de 10,48MM€.



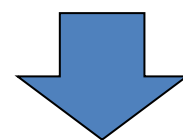
5.- Ahorro consumo estaciones

| Año | Tracción (kWh) | Ahorro frente a 2012 (kWh) | Ahorro frente a 2012 en CO2 (0,521 kg CO2/kWh) | Ahorro € frente a 2012 (0,11€/kWh) |
|-------|----------------|----------------------------|--|------------------------------------|
| 2.012 | 205.180.797 | | | |
| 2.013 | 181.064.754 | 24.116.043 | 94.334.737 | 2.652.764,78 € |
| 2.014 | 180.968.998 | 24.211.800 | 94.284.848 | 2.663.297,95 € |
| 2.015 | 178.622.357 | 26.558.441 | 93.062.248 | 2.921.428,47 € |
| 2.016 | 177.475.182 | 27.705.615 | 92.464.570 | 3.047.617,68 € |



El consumo 2012 (antes PAE):

205.180.797 kWh/año



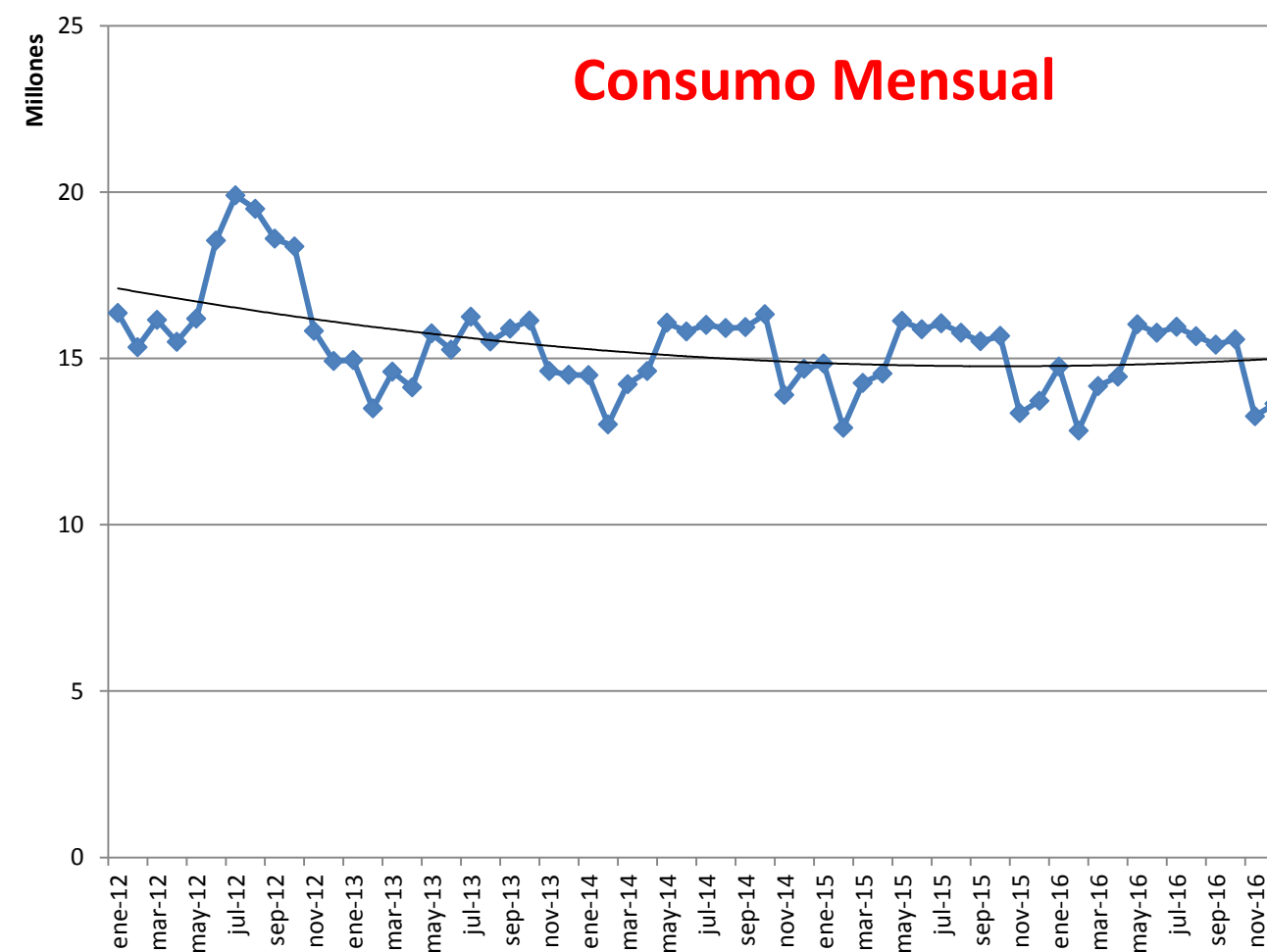
Ahorro Acumulado (hasta 2016):

102.591.899 kWh/año

**AHORRO
(49,9 %)**

5.- Ahorro acumulado estaciones

- **102.59 millones de kWh**, con una media anual de 26,64 millones de kWh.
- **374.146 toneladas CO₂**, con una media anual de 93,536 toneladas de CO₂
- **25,03 toneladas SO₂**, con una media anual de 6,26, toneladas de SO₂
- **17,75 toneladas NO_x**, con una media anual de 4,44 toneladas de Nox
- **11,28 MM€**, con una media anual de 2,82MM€.



Metro de Madrid está certificado por la **UNE-EN ISO 14001**, en el Sistema de Gestión Ambiental, y los sistemas auditados responden a un alto nivel de madurez y conformidad con los requisitos de la norma

Principios de actuación en materia de gestión medioambiental son:

- Desarrollar e implantar Procesos ágiles y eficientes medioambientales
- Favorecer un entorno de colaboración, compromiso y participación de sus empleados, en la gestión medio ambiental diaria.
- Mejorar la gestión para minimizar el impacto en el Medio Ambiente.
- Optimizar el uso de los recursos y de las materias primas, contribuyendo al principio de prevención de la contaminación.
- Cumplir la legislación medioambiental de forma eficaz, eficiente y segura.
- Fomentar los valores ambientales en relación con la cadena de proveedores de obras, bienes y servicios.
- Aumentar el grado de concienciación del personal en relación con la protección del Medio Ambiente, diseñando canales de comunicación más eficaces.
- Difundir la Política Ambiental entre sus empleados, proveedores y otras partes interesadas.



- Ahorro acumulado: **483,63 GWh** (hasta 2016)
- Ahorro medio anual : **120,91 GWh**
- **Ratios de consumo del material móvil (kWh/cxkm):**
 - inicio PAE: **2,5 kWh/cxkm**
 - Año 2016: **2 kWh/cxkm.**